



FRIEDRICH-SCHILLER-
UNIVERSITÄT
JENA

Rekonstruktion des Polarlichtovals anhand bodengebundener Beobachtungen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt dem Rat der
PHYSIKALISCH-ASTRONOMISCHEN FAKULTÄT
der

FRIEDRICH-SCHILLER-UNIVERSITÄT JENA

von

M. Sc. Daniel Wagner

geboren am 25.07.1990 in Heiligenstadt

Jena, 3. Juni 2020

GUTACHTER:

1. Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

*Astrophysikalisches Institut und Universitäts-Sternwarte
Friedrich-Schiller-Universität Jena*

2. Prof. Dr. Hermann Lühr

*Deutsches GeoForschungsZentrum
Helmholtz-Zentrum Potsdam*

3. Prof. Dr. Arnold Hanslmeier

*Institut für Physik
Universität Graz*

TAG DER DISPUTATION: 26. NOVEMBER 2020

Zusammenfassung

In der vorliegenden Dissertation werden bodengebundene Sichtungen von Polarlichtern (Aurora borealis bzw. australis) genutzt, um die Position des magnetischen Pols in korrigierten geomagnetischen Koordinaten (CGM) sowie Informationen über die magnetische Aktivität, die mit der Sonnenaktivität korreliert, abzuleiten. Dazu wird zunächst geprüft, wie die Ausdehnung des Polarlichtovals vom Level der magnetischen Aktivität, charakterisiert durch den Kp-Index, abhängt. Außerdem wird untersucht, ob die Verschiebung des Ovalzentrums in Mitternachtsrichtung von der Stärke der magnetischen Störung beeinflusst wird. Diese Informationen sind notwendig, um die Modelle der Polarlichtovals zu validieren, die in weiteren Schritten zur Rekonstruktion des Ovals aus bodengebundenen Sichtungen verwendet werden. Mit Hilfe der Bayes-Inferenz wird die Position des CGM-Pols sowie der Kp-Index aus Sichtungen der Polarlichter abgeleitet. Zunächst wird die Methode anhand synthetischer Beobachtungen sowie zweier moderner Geomagnetstürme aus den Jahren 2003 und 2015 getestet. Dabei konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Methode Ergebnisse liefert, die innerhalb des Fehlerbereichs ($\sim 1^\circ$) in guter Übereinstimmung mit den Vorgaben und Messwerten der jeweiligen Beobachtungen sind. Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt auf der Untersuchung historischer Stürme, für die keine direkten Magnetfeldmessungen vorhanden sind. Zunächst wird ein Polarlichtkatalog, in dem alle nötigen Informationen aus den Originalberichten zusammengetragen werden, erstellt. Damit können verschiedene historische Stürme untersucht werden. Für den starken Sturm von 1859 (Carrington-Event) sind die Ergebnisse der Bayes-Inferenz in guter Übereinstimmung mit Angaben aus terrestrischen Magnetfeldmodellen. Für acht weitere historische Stürme zwischen 1716 und 1882 ist die Datenlage unzureichend, weshalb hier ungenauere Ergebnisse erzielt werden. Für diese Fälle kann das Verfahren auf die Berechnung des Kp-Index beschränkt werden, was zu guten Ergebnissen führt. Diese können verwendet werden, um die Zeitreihe des Kp-Index auf die Zeit vor direkten Messungen auszudehnen, was Rückschlüsse über die Sonnenaktivität zulässt. Im Allgemeinen kann die errechnete Lage des CGM-Pols zum Vergleich mit paläomagnetischen Erdmagnetfeldmodellen genutzt werden.

Abstract

In this dissertation, ground-based aurora sightings (aurora borealis and australis) are used to derive the position of the magnetic pole in corrected geomagnetic coordinates (CGM) as well as information about the geomagnetic activity which correlates with the solar activity. For this purpose, it is first examined as to how the extension of the auroral oval depends on the level of magnetic activity, characterized by the Kp-index. Furthermore, it is investigated whether the oval center's nightside shift is influenced by the strength of the magnetic disturbance. This information is necessary in order to validate those models of the auroral ovals which are used in further steps to reconstruct the oval from ground-based observations. With the help of Bayesian inference, the position of the CGM-pole as well as the Kp-index are derived from aurora sightings. The method is first tested using synthetic observations and two modern geomagnetic storms from 2003 and 2015. It is shown that the developed method provides results that are in good agreement with the parameters and measured values of the respective observations. The main focus of this work is the investigation of historical storms for which no direct magnetic field measurements are available. First, an aurora catalogue is compiled, in which all the necessary information from the original reports are gathered. With this catalogue, different historical storms can be investigated. For the strong storm of 1859 (Carrington event), the results of the Bayesian inference are well in agreement with data from terrestrial magnetic field models. For eight other historical storms between 1716 and 1882 the data availability is insufficient, thus the results are less precise. In such cases, the method can be limited exclusively to the calculation of the Kp-index, which provides good results. Therefore, they can be used to extend the time series of the Kp-index before direct measurements and to draw conclusions about solar activity. In general, the calculated position of the CGM-pole can be used for comparison with paleomagnetic field models.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Scheibendynamo zum Erklären der Dynamotheorie	8
2.2	Erzeugung eines torusförmigen Magnetfeldes	9
2.3	Erzeugung poloidaler Felder aus toroidalen Feldern infolge der Konvektion	10
2.4	Vergleich verschiedener Rekonstruktionen des Geomagnetpols sowie Lage des Pols zwischen 8000 v. Chr. und 1990	13
2.5	Zeitliche Variation des aa- und ap-Index	15
2.6	Mittlere jährliche Sonnenflecken-Gruppenzahl	17
2.7	Magnetosphäre der Erde	21
2.8	Ablauf der magnetischen Rekonnexion und magnetischen Konvektion .	22
2.9	Ionosphärische Konvektion und daraus folgende Ströme	23
2.10	Vergleich zwischen konvektiven und Teilsturm-Elektrojets	26
2.11	Dst-Index Juli 2000	27
2.12	Darstellung der Isochasmen nach Fritz	28
2.13	Terella-Experiment nach Birkeland	29
2.14	Übergänge des atomaren Sauerstoffs	30
2.15	Vergleich zwischen Polarlichtzone und Polarlichtoval	31
2.16	Erscheinungsformen der Polarlichter	32
3.1	Ermitteln der Polarlichtposition anhand von Hintergrundsternen	42
3.2	Berechnung der QD-Koordinaten	45
3.3	Vergleichen zwischen kleiner und großer Halbachse des CH-Aurora-2014- Modells	46
3.4	DE1 Rohaufnahme vom 05.02.1982	47
3.5	Verdeutlichung der Methode sowie Ergebnis der Berechnung vom 05.02.1982 02:25:54 UT	48
3.6	Zusammenhang zwischen Radius und Kp-Index im Vergleich mit anderen Arbeiten	50

3.7	Vergleich der Verschiebung des Ovalzentrums aus dem CH-Aurora-2014-Modell sowie der vorliegenden Arbeit	53
3.8	Vergleich der Radiuszunahme im Sonnenmaximum und Sonnenminimum	54
4.1	Zhang-Paxton-Modell für zwei verschiedene Kp-Indizes	60
4.2	Darstellung des Holzworth- und Zhang-Paxton-Polarlichtovals	62
4.3	Vergleich zwischen theoretischer und beobachteter Polarlichthöhe . . .	63
4.4	Veranschaulichung der Winkelbeziehungen im Auroraoval	65
4.5	Verteilung der synthetischen Beobachtungen	72
4.6	Ergebnisse der synthetischen Beobachtungen	73
4.7	St. Patrick's Day-Sturm Kp-Index sowie SDO HMI Aufnahme der Sonne	77
4.8	Geografische Verteilung aller 235 gefundenen Beobachtungen des St. Patrick's Day-Sturms 2015	78
4.9	Halloween-Sturm Kp-Index sowie MDI SOHO Aufnahme der Sonne . .	81
4.10	Geografische Verteilung aller 207 gefundenen Beobachtungen des Halloween-Sturms 2003	81
4.11	Carringtons Zeichnung der Sonnenfleckengruppe 1859	84
4.12	Häufigkeitsverteilung der Beobachtungen des Carrington-Events	85
4.13	Darstellung der genutzten Beobachtungen des Carrington-Events	86
4.14	Zeitliche Einordnung der historischen Geomagnetstürme	90
A.1	Geografische Verteilung der 13 magnetischen Observatorien, die zum Kp-Index beitragen	A2
A.2	Vergleich zwischen mittlerer jährlicher Sonnenfleckenzahl und aa-Index	A3
A.3	NOAA Skala zur Einteilung geomagnetischer Stürme	A4
D.1	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter für den St. Patrick's Day-Sturm 2015	D14
D.2	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter für den Halloween-Sturm 2003	D14
D.3	Geografische Verteilung aller 532 gefundenen Beobachtungen des Carrington-Events.	D23
D.4	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter für August 1859 .	D24
D.5	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter für September 1859	D24
D.6	Geografische Verteilung der Beobachtungen von 1716 bis 1737	D40
D.7	Geografische Verteilung der Beobachtungen von 1770 bis 1882	D41
D.8	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des Kp-Index für die Stürme zwischen 1716 und 1882	D42

Tabellenverzeichnis

3.1	Begriffe in historischen Berichten	39
3.2	Linearer Zusammenhang zwischen Ovalradius und Kp-Index	51
4.1	Übersicht über die Methoden	71
4.2	Ergebnisse der synthetischen Beobachtungen	75
4.3	Ergebnisse des St. Patrick's Day-Sturms 2015	78
4.4	Ergebnisse des Halloween-Sturms 2003	82
4.5	Ergebnisse des Carrington-Events	88
4.6	Ermittelte Kp-Indizes für acht historische Geomagnetstürme	91
A.1	Übersicht über verschiedene Erdmagnetfeldmodelle	A1
B.1	Ergebnisse der Verschiebungen und Radien aus den DE1-Aufnahmen .	B1
B.2	Verwendete Satellitenbeobachtungen im Sonnenmaximum	B2
B.3	Verwendete Satellitenbeobachtungen im Sonnenminimum	B3
C.1	Koeffizienten c zur Berechnung des Kp-Index	C1
C.2	Koeffizienten zur Berechnung der A_i und α_j	C1
C.3	Koeffizienten d zur Berechnung der maximalen Energie des Elektronen- flusses Q_{\max}	C1
C.4	Koeffizienten a_{kj} und b_{kj} zur Berechnung der Koeffizienten A_{ij}	C2
D.1	Verwendete Polarlichtkataloge	D2
D.2	Ergebnisse der synthetischen Beobachtungen nach Variation der Höhe .	D3
D.3	186 genutzte Polarlichtsichtungen des St. Patrick's Day-Sturms 2015 . .	D4
D.4	Quellen der 186 genutzten Beobachtungen des St. Patrick's Day-Sturms	D8
D.5	49 ungenutzte Polarlichtsichtungen des St. Patrick's Day-Sturms 2015 .	D11
D.6	Quellen der 49 ungenutzten Beobachtungen des St. Patrick's Day-Sturms	D13
D.7	128 Polarlichtsichtungen des Halloween-Sturms 2003	D15
D.8	Quellen der 128 genutzten Beobachtungen des Halloween-Sturms	D18

D.9	79 ungenutzte Polarlichtsichtungen des Halloween-Sturms 2003	D20
D.10	Quellen der 79 ungenutzten Beobachtungen des Halloween-Sturms . . .	D22
D.11	167 verwendeten Sichtungen des Carrington-Events zwischen dem 28. August und dem 05. September 1859	D25
D.12	Quellen der 167 verwendeten Sichtungen des Carrington-Events	D29
D.13	365 nicht verwendeten Sichtungen des Carrington-Events zwischen dem 28. August und dem 05. September 1859	D30
D.14	Quellen der 365 nicht verwendeten Sichtungen des Carrington-Events .	D38
D.15	Auflistung der 15 verwendeten Sichtungen des Geomagnetsturms 1716 .	D43
D.16	Auflistung der 43 nicht verwendeten Sichtungen des Geomagnetsturms 1716	D44
D.17	Auflistung der 65 Sichtungen des Geomagnetsturms im Februar 1730 .	D45
D.18	Auflistung der 23 Sichtungen des Geomagnetsturms im Oktober 1730 .	D47
D.19	Auflistung der 15 verwendeten Sichtungen des Geomagnetsturms 1737 .	D48
D.20	Auflistung der 23 nicht verwendeten Sichtungen des Geomagnetsturms 1737	D49
D.21	Auflistung der 109 Sichtungen des Geomagnetsturms 1770	D50
D.22	Auflistung der 50 Sichtungen des Geomagnetsturms 1847	D53
D.23	Auflistung der 153 Sichtungen des Geomagnetsturms 1872	D55
D.24	Auflistung der 59 Sichtungen des Geomagnetsturms 1882	D59

Konventionen, Notationen und Abkürzungen

In dieser Arbeit werden elektrische Stromsysteme innerhalb der Magnetosphäre und Ionosphäre beschrieben. Dabei gilt grundsätzlich, dass sich die Elektronen entgegengesetzt zum elektrischen Strom bewegen.

Bei der Darstellung der Beobachtungen sowie Resultate werden Übersichtskarten in zwei verschiedenen Projektionen verwendet, die mit Hilfe von QGIS 2.18.16 erstellt wurden. Die erste Projektion ist “Google Mercator” mit dem räumlichen Referenzsystem EPSG:900913. Als zweites wird eine mittabstandstreue Azimutalprojektion des geographischen Nordpols verwendet, die das räumliche Referenzsystem EPSG:102016 nutzt.

Für die modernen und historischen Polarlichtbeobachtungen ist neben dem Standort auch das entsprechende Land mit dem Ländercode nach dem ISO 3166 Alpha-3 Standard gegeben.

Zum Erzielen der Resultate in der vorliegenden Arbeit wurde verschiedene Software genutzt. Darunter gfortran Version 7.4.1, welches zum Durchführen der Bayes-Inferenz genutzt wurde. Zum Darstellen der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der einzelnen Parameter wurde auf IDL Version 8.3 zurückgegriffen. Für die Verarbeitung der Satellitendaten wurde Matlab R2018a Version 9.4.0.813654 verwendet. Die Resultate wurden unter Verwendung von Origin Pro 2020 Version 9.7.0.188 dargestellt. Weiterhin wurde auf QGIS 2.18.16 sowie Stellarium 0.16.1 zurückgegriffen.

Die folgenden Abkürzungen werden in der vorliegenden Arbeit verwendet, wobei zumeist beim ersten Auftreten eine Erklärung erfolgt. Der Deutlichkeit halber werden einige der hier erwähnten Abkürzungen mehrfach erklärt.

Allgemeine Abkürzungen

AACGM	Höhenangepasste korrigierte geomagnetische Koordinaten (altitude adjusted corrected geomagnetic coordinates)
CGM	Korrigierte geomagnetische Koordinaten (corrected geomagnetic coordinates)
CHAMP	CHAllenging Minisatellite Payload
CME	Koronaler Massenauswurf (coronal mass ejection)
DE1	Dynamics Explorer 1
GUVI	Global Ultraviolet Imager
HMI	Helioseismic and Magnetic Imager
IGRF	Internationales geomagnetisches Referenzfeld
IGY	Internationales geophysikalisches Jahr
IMF	Interplanetares magnetisches Feld
KOS	Koordinatensystem
MDI	Michelson Doppler Imager
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PREM	Preliminary Reference Earth Model
QD	Quasi-Dipol-Koordinaten
RMSD	Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (root mean square deviation)
SDO	Solar Dynamics Observatory
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
TIMED	Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics
UV	Ultraviolett

Magnetische Indizes

Index	Erläuterung
aa	Index der magnetischen Aktivität aus zwei Messstationen
ap	Skala des Kp-Index in Einheiten von 2 nT (bei 50° geogr. Breite)
Dst	Gestörte Sturmzeit (disturbed storm time)
K	Meist gestörte horizontale Komponente des magnetischen Feldvektors in einem 3-Stunden-Intervall
Ks	Standardisierter K-Index
Kp	Planetare Kennziffer als Mittelwert der Ks-Indizes, quasi-logarithmische Skala zur Angabe der globalen magnetischen Aktivität

Symbole und Formelzeichen

Symbol	Einheit	Erläuterung
LT	h	Lokalzeit
MLT	h	Magnetische Lokalzeit
UT	h	Universalzeit
R_E	km	Mittlerer Erdradius: $R_E = 6371$ km
ϑ	°	Breite eines Punktes im jeweiligen KOS
Θ	°	Kobreite eines Punktes im jeweiligen KOS: $\Theta = 90^\circ - \vartheta$
ϕ	°	Länge eines Punktes im jeweiligen KOS
\vec{E}	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	Elektrische Feldstärke
\vec{B}	T	Magnetische Flussdichte
$\vec{\omega}$	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit
g_l^m, h_l^m		Gauß-Koeffizienten
P_l^m		Schmidt-normalisierte zugeordnete Legendre-Funktionen
R		Zürich Sonnenfleckenzahl
N_G		Anzahl Sonnenfleckengruppen
N_S		Anzahl Sonnenflecken
σ		Standardabweichung
HP	GW	Hemisphärische Leistung

Für meine Eltern

*"What makes a clear ray tremble in the night?
What strikes a slender flame into the firmament?
Like lightning without storm clouds.
Climbs to the heights from Earth?
How can it be that frozen steam
Should midst winter bring forth fire?"*

— **Mikhail Lomonosov** —

Original (1743)

*„Was lässt einen Strahl in der Nacht
erheben?
Was zeichnet eine zarte Flamme auf das
Firmament?
Wie ein Blitz ohne Sturmwolken.
Von der Erde in die Höhe steigend?
Wie kann es sein, dass gefrorener Dampf
Mitten im Winter Feuer entfacht?"*

— **Mikhail Lomonosov** —

Freie deutsche Übersetzung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	7
2.1	Das Erdmagnetfeld	7
2.1.1	Entstehung und Aufbau	7
2.1.2	Variationen des Feldes	12
2.1.3	Messung des Magnetfeldes - Magnetische Indizes	13
2.2	Sonne und Sonnenwind	15
2.2.1	Variationen der Sonnenaktivität	16
2.2.2	Sonnenwind und IMF	19
2.3	Wechselwirkungen zwischen IMF und Erdmagnetfeld	19
2.3.1	Magnetosphäre und Ionosphäre	20
2.3.2	Magnetosphären - Ionosphären - Kopplung	23
2.4	Die Polarlichter	27
2.4.1	Geschichte der Polarlichtforschung	27
2.4.2	Entstehung der Polarlichter	29
2.4.3	Geomagnetische Stürme und Teilstürme	33
3	Auswertung von Polarlichtbeobachtungen	35
3.1	Historische Sichtungen - Polarlichtkataloge	35
3.2	Moderne Polarlichtbeobachtungen	39
3.2.1	Übersicht zu modernen Beobachtungstechniken	39
3.2.2	Untersuchung der Abhängigkeit des Polarlichtovals vom Kp-Index mittels Satellitenaufnahmen	43
4	Rekonstruktion des Polarlichtovals aus bodengebundenen Sichtun- gen	55
4.1	Bayessche Statistik	55
4.1.1	Modelle des Polarlichtovals	57

4.1.2	Berechnung des Polarlichtovals	63
4.1.3	Grenzen der Methode	69
4.1.4	Testen der Methode an synthetischen Beobachtungen	71
4.2	Rekonstruktion anhand moderner Beispiele	76
4.2.1	Der St. Patrick's Day-Sturm vom 17. März 2015	76
4.2.2	Der Halloween-Sturm vom 29. Oktober 2003	80
4.3	Rekonstruktion historischer Stürme	83
4.3.1	Das Carrington-Event 1859	84
4.3.2	Untersuchung weiterer historischer Stürme	89
5	Fazit und Ausblick	93
	Anhang	A1
A	Weiterführende Informationen zu Magnetfeldmodellen, magnetischen Indizes sowie Geomagnetstürmen	A1
B	Verwendete Satellitenbeobachtungen und Ergebnisse	B1
C	Informationen zur Berechnung des theoretischen Polarlichtovals	C1
D	Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen	D1
	Literaturverzeichnis	E1
	Zusätzliche Dokumente	F1

Kapitel 1

Einleitung

Am 13. März 1989 führte ein großräumiger Stromausfall in der Provinz Quebec in Kanada dazu, dass viele Menschen in dunklen und kalten Häusern aufwachten. Andere wiederum waren in Aufzügen gefangen, Büros und Schulen wurden geschlossen. Der Nahverkehr kam teilweise zum Erliegen und der Flughafen in Montreal musste geschlossen werden [Odenwald, 2017]. Stromausfälle können durchaus häufig auftreten, betreffen jedoch zu meist nur kleinere Gebiete. Was ist also das Besondere am Quebec “Black Out” vom 13. März 1989? In diesem Fall wurde der Ausfall des Stromnetzes durch zwei massive koronale Massenauswürfe (CMEs) am 10. und 12. März ausgelöst. Die solaren Ausbrüche trafen am 13. März um 01:27 Universalzeit (UT) bzw. 07:43 UT die Erde. Darauf folgte ein etwa zwei Tage andauernder Geomagnetsturm mit einer Reihe von Teilstürmen [Boteler, 2019]. Dadurch kam es zu einer Vielzahl von Problemen beispielsweise mit Satelliten, deren Schaltkreise durch das gestörte Erdmagnetfeld beeinflusst wurden [Allen et al., 1989]. Der Kp-Index des Sturms lag mit 9+ bei seinem Maximum [Boteler, 2019]. Doch nicht nur Satelliten wurden gestört. Die starke Störung des Erdmagnetfeldes führte, aufgrund des hohen elektrischen Widerstands des Bodens in Quebec, zur Ausbildung elektrischer Felder, die ihrerseits geomagnetisch induzierte Ströme im Kabelnetz verursachten. Daraus resultierte eine Überlastung des Stromnetzes und der folgende Stromausfall. Neben diesen negativen Auswirkungen des Geomagnetsturms kam es zu atemberaubenden Polarlichtsichtungen bis in geringe geografische Breiten [Boteler, 2019].

Wie an diesem Beispiel zu sehen ist, kann die Aktivität der Sonne das Leben auf der Erde stark beeinflussen. Veränderungen der Sonne, des Sonnenwindes und damit verbunden der Magnetosphäre und Ionosphäre werden als “Weltraumwetter“ bezeichnet [Hanslmeier, 2010]. Diese können technische Geräte wie auch das Leben der Menschen beeinflussen. Die Auswirkungen werden umso gravierender, je technologisierter unsere Gesellschaft ist. Vorhersagen über das Weltraumwetter werden daher zunehmend wichtig für unser all-

tägliches Leben. Um dies zu ermöglichen, ist ein gutes Verständnis der Variation der Sonnenaktivität erforderlich, wozu die Auswertung geomagnetischer Stürme wie im März 1989 beitragen kann. Da solche Stürme mit starken und auffälligen Polarlichtern gepaart sind, können diese ein Schlüssel zum Verstehen der Sonnenaktivität darstellen.

Polarlichter sind Leuchterscheinungen am Nachthimmel, die entstehen, wenn geladene Teilchen des Sonnenwindes über gewisse Umwege in die obere Atmosphäre eindringen, wo sie Atome und Moleküle zum Leuchten anregen [Akasofu, 2009]. Doch nicht erst in modernen Zeiten spielen Polarlichter für die Menschen eine Rolle. Viele Kulturen, die in Regionen angesiedelt waren, in denen Polarlichter - wenn auch nur unter besonderen Bedingungen - auftreten können, haben schriftliche Aufzeichnungen über diese Erscheinungen angefertigt [Paschmann *et al.*, 2002]. Dabei spielten die Polarlichter zumeist in der Astrologie eine Rolle und hatten damit ebenfalls Auswirkungen auf das menschliche Leben [Bone, 1996]. Diese historischen Aufzeichnungen ermöglichen es nicht nur moderne Geomagnetstürme zu untersuchen, sondern auch über längere Zeiträume Informationen über die Sonnenaktivität zu gewinnen. Die Auswertung historischer terrestrischer Archive und die Aufbereitung sowie Nutzung der Daten für moderne wissenschaftliche Zwecke ist das zentrale Ziel der Terra-Astronomie, in deren Rahmen auch die Untersuchung von Polarlichtsichtungen eine wichtige Rolle spielt. Siscoe und Verosub [1983] wiesen darauf hin, dass im Falle von hundertprozentig genauer Beobachtungen aller Aurorae das Ableiten der zeitlichen Entwicklung der Sonnenaktivität sowie der Position des Geomagnetspols möglich wäre. Historische wie auch moderne Sichtungen von Polarlichtern können genutzt werden, um die Lage und Ausdehnung des Polarlichtovals zu rekonstruieren. Polarlichter treten auf beiden Hemisphären in ringförmigen Bereichen um die Geomagnetspole auf, die als Polarlichtovals bezeichnet werden. Diese Ovalen können zum Beispiel durch das Modell von Holzworth *et al.* [1975] wie auch Zhang und Paxton [2008] beschrieben werden. Beiden ist gemein, dass die Ausdehnung des Ovals mit steigendem Kp-Index anwächst. Der Kp-Index ist dabei ein Maß der globalen magnetischen Aktivität und wurde 1949 von Bartels, basierend auf den Ausarbeitungen in Bartels *et al.* [1939], eingeführt. Das Besondere ist, dass der Kp-Index von der Sonnenaktivität moduliert wird und den etwa 11-jährigen Aktivitätszyklus der Sonne widerspiegelt, der von Schwabe anhand von Sonnenfleckenzahlen entdeckt wurde [Schwabe, 1844]. Durch Rekonstruktion des Polarlichtovals aus historischen Sichtungen können damit Informationen über die Aktivität der Sonne gewonnen werden, die mit den historischen Sonnenfleckenzahlen verglichen werden können. Bisher geschah dies nur über Betrachten der Polarlichthäufigkeit, da in Phasen hoher Sonnenaktivität mehr Polarlichtsichtungen erwartet werden (Neuhäuser und Neuhäuser [2015b], Tamazawa [2017], Bekli und Chadou [2019]). Eine Rekonstruktion des Polarlichtovals mit anschließendem Ableiten des Kp-Index ist bisher jedoch nicht erfolgt.

Da die Auroraovale als Zentrum etwa den Geomagnetpol, also den Pol des genäherten Dipolfeldes des Erdmagnetfeldes, aufweisen, kann die Rekonstruktion des Ovals ebenfalls Aufschluss über die Lage des Pols geben. Diese kann mit den Ergebnissen aus paläomagnetischen Feldmodellen verglichen werden, die anhand von verschiedenen Daten das Erdmagnetfeld viele Jahrtausende in die Vergangenheit modellieren [Korte *et al.*, 2018]. Auch das Verstehen des Erdmagnetfeldes spielt dabei eine wichtige Rolle, da es als Schutzschild der Erde gegen den Sonnenwind fungiert. Siscoe und Verosub [1983] untersuchten statistisch die Polarlichthäufigkeit zwischen den Jahren 800 und 1400 in Japan und China, um die geografische Länge des Geomagnetpols einzugrenzen. Dabei wird ebenfalls nur die Polarlichthäufigkeit verwendet, im Gegensatz zur Rekonstruktion des Ovals, die in dieser Arbeit angestrebt wird. Korte und Stolze [2016] nutzten eine kreisförmige Approximation des Auroraovals zusammen mit Rekonstruktionen der Sonnenaktivität und des Erdmagnetfeldes, um den Bereich möglicher Polarlichtsichtungen in den letzten Jahrtausenden einzugrenzen. Ein Vergleich mit bekannten Beobachtungen lieferte eine gute Übereinstimmung. Anders als im Modell von Korte und Stolze [2016] wird in der vorliegenden Arbeit weder der Kp-Index noch die Position des Pols vorgegeben. Zudem werden Modelle des Ovals statt einer kreisförmigen Annäherung genutzt.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, mit deren Hilfe aus bodengebundenen Polarlichtsichtungen das Auroraoval rekonstruiert werden kann. Die Ergebnisse können genutzt werden, um die magnetische Aktivität in Form des Kp-Index zu bestimmen, was wiederum Aufschluss über die Sonnenaktivität gibt. Diese Information kann zum Vergleich mit anderen Rekonstruktionen der Sonnenaktivität, etwa aus Sonnenfleckenzahlen [Clette *et al.*, 2014] oder kosmogenen Isotopen wie ^{14}C und ^{10}Be , genutzt werden [Delaygue und Bard, 2011]. Beiden ist gemein, dass Inhomogenitäten in den Zeitreihen die korrekte Wiedergabe der Sonnenaktivität erschweren. Ein unabhängiger Vergleich, wie er mit Polarlichtern geliefert werden kann, ist also von großem Interesse. Des Weiteren ist anhand der Lage des Ovals das Ableiten der Position des Geomagnetpols möglich, welche mit den Resultaten aus paläomagnetischen Feldmodellen [Korte *et al.*, 2018] verglichen werden kann. Die verschiedenen Feldmodelle weisen trotz ähnlicher Datenbasis Unterschiede in der Lage des Pols auf. Demnach ist auch hier ein unabhängiger Vergleich interessant. Zur Berechnung des Ovals wird die Methode der Bayes-Inferenz genutzt. Anhand von Beobachtungsdaten und einem Modell des Ovals kann dann die Position des Pols sowie der Kp-Index berechnet werden. Dazu werden zwei Modelle genutzt. Darunter das empirische Modell nach Holzworth *et al.* [1975], welches aus bodengebundenen All-Sky-Aufnahmen konstruiert wurde. Des Weiteren wird das Modell nach Zhang und Paxton [2008] verwendet, welches auf Satellitenaufnahmen des Ovals im ultravioletten Wellenlängenbereich basiert. Kosar *et al.* [2018] haben gezeigt,

dass die Grenzen des Ovals aus diesem Modell mit bodengebundenen Daten verträglich sind. Als Daten werden bodengebundene Sichtungen der Polarlichter genutzt, wobei insbesondere eine Anwendung auf historische Geomagnetstürme erfolgen soll. Daher ist die Erstellung eines Polarlichtkatalogs erforderlich, wobei stets die Originalquellen der Beobachtungen zu sichten sind, um alle erforderlichen Informationen, wie den Ort und den Beobachtungszeitpunkt, aber auch die Position der Aurora am Himmel, zu ermitteln. Die Methode wurde zur Validierung auf zwei moderne Geomagnetstürme aus den Jahren 2003 und 2015 angewendet. Anschließend wurde sie auf neun historische Stürme ausgeweitet. Der Untersuchung der historischen Geomagnetstürme kommt dabei eine besondere Rolle zu. Extreme Events wie 1989 treten relativ selten auf, sodass wenig über diese starken Stürme bekannt ist. Unter Nutzung historischer Aufzeichnungen können weitere solcher Events zugänglich gemacht werden und die ermittelten Daten können für wissenschaftliche Auswertungen herangezogen werden.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Kapitel 2 beschreibt die Entstehung der Polarlichter. Dabei wird zunächst das Erdmagnetfeld beschrieben, welches eine Schlüsselrolle im Entstehungsprozess inne hat. Anschließend wird auf die Sonne, ihre Aktivität und den Sonnenwind eingegangen. Letzterer liefert die Teilchen, die zu den Leuchterscheinungen in der oberen Atmosphäre führen. Dazu müssen die Elektronen und Protonen des Sonnenwindes allerdings in das Erdmagnetfeld und später in die Ionosphäre eindringen, was ebenfalls in diesem Kapitel erläutert wird. Danach wird die Geschichte der Polarlichtforschung sowie der aktuelle Stand der Forschung beschrieben. Der geschichtliche Aspekt wird einbezogen, um den jeweiligen Wissenstand der Menschen einschätzen zu können und so historische Berichte besser zu verstehen.

In Kapitel 3 wird auf historische und moderne Sichtungen eingegangen. Dabei wird beschrieben wie Fotografien und Berichte für die präsentierte Methode aufgearbeitet werden. Anschließend wird das Polarlichtoval genauer untersucht. Dazu werden globale Aufnahmen des Satelliten “Dynamics Explorer 1” genutzt, um einen Zusammenhang zwischen dem Kp-Index und dem Radius des Ovals abzuleiten. Zudem wird die Verschiebung des Ovalzentrums für verschiedene Level der magnetischen Aktivität betrachtet. Beides wird zum Vergleich mit den im weiteren Verlauf genutzten Ovalmodellen genutzt.

Kapitel 4 beschreibt schließlich, wie die Ovalparameter mittels der Bayes-Inferenz aus bodengebundenen Sichtungen ermittelt werden können. Die Methode wird an synthetischen und modernen Beobachtungen getestet. Anschließend erfolgt eine Ausweitung auf historische Zeiträume.

Die Zusammenfassung sowie ein Ausblick finden sich in Kapitel 5.

Kapitel 2

Grundlagen

Zunächst soll auf die Entstehung der Polarlichter und die damit verbundenen Prozesse eingegangen werden. Dazu wird als Erstes das Magnetfeld der Erde behandelt, welches einen unerlässlichen Schutz gegen solare Strahlung darstellt, aber auch eine wichtige Komponente im Entstehungsprozess der Aurorae ist [Bone, 1996]. Danach soll die Sonne sowie deren Aktivität betrachtet werden. Die Sonne liefert über den Sonnenwind die Teilchen, die letztendlich zur Anregung von Atomen und Molekülen in der oberen Atmosphäre führen [Akasofu, 2009]. Anschließend werden die in der Magnetosphäre und Ionosphäre auftretenden Prozesse genauer beleuchtet, die schlussendlich zum Eindringen der solaren Teilchen in die Atmosphäre beitragen. Abgeschlossen wird das Kapitel durch eine Erläuterung der Polarlichter selbst.

2.1 Das Erdmagnetfeld

In diesem Kapitel wird das terrestrische Magnetfeld näher beschrieben. Dabei wird erläutert, wie das Magnetfeld entsteht und welchen Variationen es sowohl räumlich als auch zeitlich unterworfen ist. Des Weiteren wird insbesondere auf geomagnetische Störungen eingegangen, die ihren Ursprung in der Wechselwirkung zwischen dem terrestrischen Magnetfeld und dem Sonnenwind haben. Dabei spielt das Erdmagnetfeld eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von Polarlichtern, weshalb grundlegende Kenntnisse erforderlich sind.

2.1.1 Entstehung und Aufbau

Erzeugt wird das Magnetfeld der Erde, welches an der Oberfläche eine Stärke zwischen $30\,\mu\text{T}$ und $60\,\mu\text{T}$ aufweist [Olsen et al., 2015], durch Dynamoprozesse im Erdkern, der sich wiederum in einen äußeren und inneren Kern unterteilt. Modelle des Erdkerns, wie

das PREM Modell von *Dziewonski et al.* [1981], suggerieren einen Radius von 1221,5 km für den inneren Kern. Der äußere Kern erstreckt sich von diesem Wert ausgehend bis zu 3480,0 km. Seismische Messungen deuten auf einen festen inneren und flüssigen äußeren Kern hin. Allgemein wird angenommen, dass der gesamte Kern zu etwa 80 % aus Eisen und zu 4 % aus Nickel besteht [Brett, 1976]. Damit verbunden ist eine hohe elektrische Leitfähigkeit, die für Dynamoprozesse unabdingbar ist.

Ein einfacher Dynamo, der bereits zu Beginn des 20. Jh. von Joseph Larmor vorgeschlagen wurde [Larmor, 1919a], ist der Scheibendynamo. Dabei wird eine Scheibe aus einem elektrisch leitenden Material mit der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ in einem äußeren Magnetfeld \vec{B} in Drehung versetzt. Durch die auf die Elektronen wirkende Lorentzkraft wird ein Strom in der Scheibe erzeugt, der vom Zentrum in Richtung Rand fließt. Dieser Strom kann am Rand der Scheibe mittels eines Kabels abgenommen werden, welches seinerseits so um die Rotationsachse der Scheibe gewickelt ist, dass das äußere Magnetfeld verstärkt wird (siehe Abbildung 2.1). Nach Beginn des Dynamoprozesses kann das äußere Feld abgeschaltet werden.

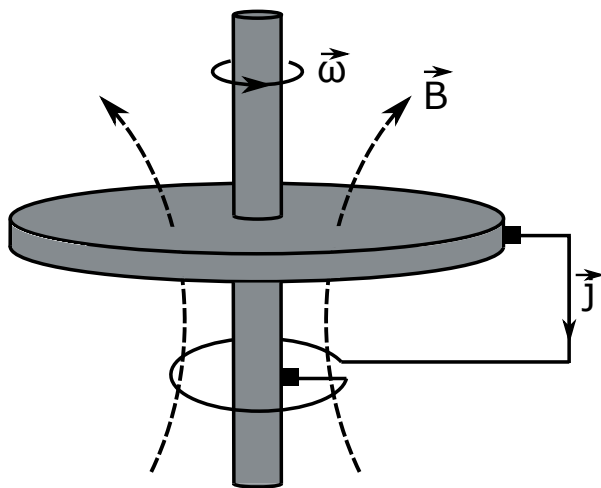


ABBILDUNG 2.1: Erklärung der Dynamotheorie anhand eines Scheibendynamos. Der durch die Lorentzkraft erzeugte Strom wird am Rand der Scheibe abgenommen und so durch eine Leiterschleife geführt, dass eine Verstärkung des Magnetfeldes erreicht wird. Nach *Priede et al.* [2010].

Dieses einfache Modell erklärt bereits die Grundlagen eines sich selbst erhaltenden Dynamos. Es wird klar, dass ein Übergang von mechanischer Energie in magnetische Energie erfolgen muss. Der Scheibendynamo ist jedoch nicht einfach auf den Erddynamo zu übertragen, da die tatsächlich im äußeren Kern stattfindenden Prozesse so nicht erklärbar sind.

Mit dem α - und ω -Effekt, die eine wesentliche Rolle im Erddynamo inne haben, können die Abläufe ohne mathematische Formeln genauer erklärt werden. Entwickelt wurde dieses Modell von *Parker* [1955]. Wie zuvor wird angenommen, dass ein magnetisches Startfeld \vec{B} durch ein Geschwindigkeitsfeld \vec{v} verstärkt wird. Der Prozess der Wechselwirkung ist in Abbildung 2.2

zu sehen. Im Falle der Erde dient der äußere Erdkern als flüssiger Leiter, in dem die Feldlinien als eingefroren angenommen werden können. Das heißt, die Magnetfeldlinien sind relativ zum Material des äußeren Erdkerns als ortsfest anzusehen. Dargestellt wird die Bewegungsrichtung des elektrischen Leiters in Abbildung 2.2 als roter Zylinder. Die in

diesem Leiter eingefrorene poloidale magnetische Feldlinie wird aufgrund der Bewegung verformt und komprimiert, was zu einer lokalen Verstärkung des Feldes führt. Nach einer Rotation des äußeren Kerns und somit einer Rotation der Feldlinie, bilden sich toroidale Felder, die in beiden Hemisphären entgegengesetzt verlaufen. Der Übergang eines poloidalen zu einem toroidalen Feld infolge der Wechselwirkung mit einem Geschwindigkeitsfeld wird als ω -Effekt bezeichnet [Merrill *et al.*, 1998].

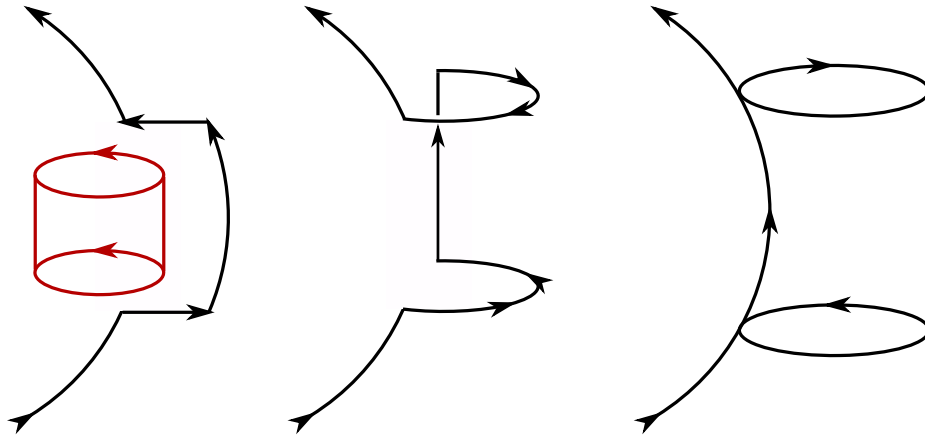


ABBILDUNG 2.2: Erzeugung eines torusförmigen Magnetfeldes aus einem poloidalen Feld, welches mit dem Geschwindigkeitsfeld (rot) wechselwirkt. Hierbei wird angenommen, dass die Feldlinie in einem leitenden Material, dem äußeren Erdkern, eingefroren ist. Die Bewegung innerhalb des Leiters führt zu einer Deformation der Feldlinie und zum Ausbilden eines komplexeren, toroidalen Feldes (rechte Abbildung). Nach Merrill *et al.* [1998].

Um eine Verstärkung des eigentlichen poloidalen Feldes zu erzielen, müssen die eben erzeugten toroidalen Felder mit einem weiteren Geschwindigkeitsfeld mit radialer Komponente wechselwirken (siehe Abbildung 2.3). Dieses Feld wird durch die Konvektion im äußeren Kern zur Verfügung gestellt. Dabei erhitzt sich Material am heißen inneren Kern, steigt auf und kühlt sich im Laufe dieser Bewegung wieder ab. Es folgt ein Absinken des Materials. Das aufsteigende Material führt zum Ausbilden einer Ausbuchtung in der toroidalen Feldlinie. Infolge der Erdrotation und der damit verbundenen Corioliskraft kommt es zu einem Eindrehen der Feldlinie, was schlussendlich erneut zu einer poloidalen Konfiguration führt. Durch diesen α -Prozess in Kombination mit dem zuvor beschriebenen ω -Effekt wird das Erdmagnetfeld aufrecht erhalten [Merrill *et al.*, 1998].

Das so erzeugte Magnetfeld kann, wie schon von William Gilbert im 17. Jh. angenommen [Bone, 1996], in erster Näherung als Dipolfeld beschrieben werden. Um höhere Ordnungen des Feldes zu untersuchen, wird die Analyse von sphärischen Harmonischen genutzt, wie sie von Gauß eingeführt wurden [Schubert und Kono, 2007]. In Merrill *et al.* [1998] wird

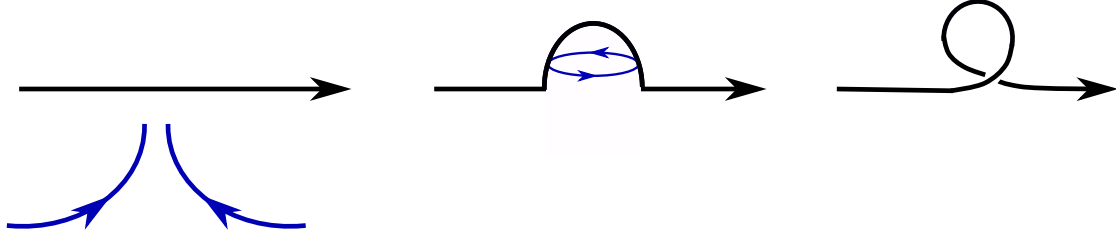


ABBILDUNG 2.3: Aufsteigendes Material des äußeren Kerns (blau, linke Grafik) führt zu einer Ausbeulung der toroidalen Feldlinien. Dieses Material führt zudem eine Rotationsbewegung aus (blau, mittlere Grafik), die eine Folge der Corioliskraft ist. Das Eindrehen der Feldlinie erzeugt erneut poloidale Magnetfelder, die das ehemalige Feld verstärken. Nach *Merrill et al.* [1998].

beschrieben, dass die Erdatmosphäre bis zu einer Höhe von 50 km als elektromagnetisches Vakuum angenommen werden kann. Folglich kann das Magnetfeld \vec{B} als divergenzfrei ($\nabla \cdot \vec{B} = 0$) und rotationsfrei ($\nabla \times \vec{B} = 0$) angesehen werden. Es folgt, dass das Feld als Gradient eines skalaren Potentials Ψ ($\vec{B} = -\text{grad } \Psi$) dargestellt werden kann, welches der Laplace Gleichung

$$\nabla^2 \Psi = 0 \quad (2.1)$$

genügt. In der sphärischen Geometrie der Erde kann dieses Potential durch

$$\Psi(r, \Theta, \phi) = R_E \sum_{l=1}^L \sum_{m=0}^l \left(\frac{R_E}{r} \right)^{l+1} \cdot [g_l^m \cos(m\phi) + h_l^m \sin(m\phi)] \cdot P_l^m(\cos \Theta) \quad (2.2)$$

dargestellt werden. Hierbei beschreibt R_E den mittleren Erdradius¹ und die Koordinaten r , Θ und ϕ den Radius, die Kobreite und die Länge. Die Kobreite wird auch Poldistanz genannt und berechnet sich über $\Theta = 90^\circ - \vartheta$, wobei ϑ die Breite angibt. g_l^m und h_l^m sind die Gauß-Koeffizienten sowie P_l^m die Schmidt-normalisierten zugeordneten Legendre-Funktionen von Grad l und Ordnung m [Schubert und Kono, 2007].

Existieren Messungen des Erdmagnetfeldes, können die Koeffizienten des Potentials so bestimmt werden, dass die Werte aus dem Modell möglichst nah an den Messwerten liegen. Wie in *Korte et al.* [2008] beschrieben, lässt sich mittels der Koeffizienten das Dipolmoment sowie die Lage der Geomagnetpole berechnen.

Um die zeitliche Evolution des Magnetfeldes zu untersuchen, wird ein zeitabhängiges

¹Der mittlere Erdradius beträgt nach dem WGS84-System $R_E = 6371$ km [Department of Defense, 1991]. Dieser Wert wird auch im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet. Im Falle der Magnetfeldmodelle wird jedoch ein Erdradius von $R_E = 6371,2$ km angenommen [Korte et al., 2008].

Modell des Hauptfeldes erstellt [Bloxham, 1992]. Dabei dienen kubische B-splines $M_k(t)$ als zeitliche Basisfunktionen, wobei die Gauß-Koeffizienten g_l^m und h_l^m durch $g_l^{m,k}$ und $h_l^{m,k}$ ersetzt werden (K - Anzahl der Basisfunktionen). Es gilt:

$$g_l^m(t) = \sum_{k=1}^K g_l^{m,k} M_k(t). \quad (2.3)$$

Für h_l^m wird analog verfahren. Daraus ergibt sich für das Potential letztendlich die folgende, zeitabhängige Form:

$$\Psi(r, \Theta, \phi, t) = R_E \sum_{l=1}^L \sum_{m=0}^l \sum_{k=1}^K \left(\frac{R_E}{r} \right)^{l+1} [g_l^{m,k} \cos(m\phi) + h_l^{m,k} \sin(m\phi)] \cdot P_l^m(\cos \Theta) M_k(t). \quad (2.4)$$

Diese Methode findet Anwendung in einer Reihe von geomagnetischen Feldmodellen, die auf verschiedensten Messungen des Magnetfeldes basieren (siehe Tabelle A.1 in Anhang A). Informationen über das vergangene Erdmagnetfeld können aus diversen Quellen gewonnen werden. Unterschieden wird hierbei zwischen archäologischen Artefakten, Vulkangestein und Sedimenten [Korte et al., 2018]. Archäologische Artefakte und Vulkangesteine wurden magnetisiert, indem sie über die Curie-Temperatur erhitzt wurden. Somit war es möglich, dass sich das Eisenoxid innerhalb der Materialien entlang des äußeren Feldes ausrichtet. Nach Abkühlen unterhalb der Curie-Temperatur bleibt die Magnetisierung erhalten. Dabei wird von thermoremanenter Magnetisierung gesprochen. Der Vorteil besteht darin, dass sowohl Richtung als auch Stärke des Feldes ableitbar sind. Zum Ermitteln der Deklination und Inklination ist im Falle der archäologischen Artefakte die Ausrichtung während des Brennvorgangs erforderlich, die selten bekannt ist. Sowohl zeitlich als auch räumlich können mit den archäologischen Artefakten und dem Vulkangestein nur einige diskrete Werte bestimmt werden [Korte et al., 2018]. Die genaue Datierung ist nur in wenigen Fällen möglich. Aus Sedimenten hingegen können oft quasi-homogene Zeitreihen abgeleitet werden. Zudem liegt eine gute geografische Abdeckung vor [Korte et al., 2018]. Allerdings ist die Datierung der Sedimentschichten schwierig und der Prozess, wie die Remanenz zustande kommt, ist nicht vollständig verstanden [Roberts et al., 2013]. Teilweise nutzen die magnetischen Feldmodelle nur eine beider Datenquellen, andere hingegen basieren auf Kombinationen. Diese Informationen sind in Anhang A in Tabelle A.1 gegeben.

2.1.2 Variationen des Feldes

Variationen des Erdmagnetfeldes wurden bereits Ende des 16. Jh. und Anfang des 17. Jh. erstmals beobachtet. Es wurde festgestellt, dass sich die Deklination, also der Winkel zwischen geografischer und magnetischer Nordrichtung, mit der Zeit ändert. Zwischen 1722 und 1723 stellte George Graham mit einem sehr empfindlichen Kompass fest, dass die Deklination auch innerhalb eines Tages variiert. Messungen in Uppsala führten zu der Erkenntnis, dass das Auftreten von Polarlichtern mit diesen Variationen korreliert [*Schubert und Kono, 2007*].

Heute ist bekannt, dass Veränderungen des Erdmagnetfeldes auf verschiedenen Zeitskalen zwischen Millisekunden und Millionen von Jahren erfolgen. Erstere haben ihren Ursprung hauptsächlich in elektrischen Strömen, welche in der Magnetosphäre und Ionosphäre fließen und durch Wechselwirkungen mit dem sich verändernden Sonnenwind entstehen. Zeitliche Änderungen über Jahre und länger werden als Säkularvariationen bezeichnet, haben ihren Ursprung also in der Erde. Eine Ausnahme für äußere Effekte über einen längeren Zeitraum stellt der Schwabezyklus der Sonne dar. Dieser zeigt sich auch in magnetischen Messungen (Vgl. Abschnitt 2.1.3), ist aber im Vergleich zu anderen Quellen relativ schwach.

Es können verschiedene Arten von Polen des Erdmagnetfeldes unterschieden werden, welche abhängig vom gewählten Koordinatensystem sind. Dabei spielt insbesondere der Geomagnetpol eine wichtige Rolle. Bei den geomagnetischen Polen handelt es sich um die Orte, an denen die Dipolachse des genäherten Dipolfeldes (hierbei wird nur der reine Dipolanteil der oben erwähnten Modelle genutzt) die Erdoberfläche schneidet.

Beim Betrachten der Position des Geomagnetpols über die letzten Jahrhunderte und Jahrtausende können klare Veränderungen festgestellt werden. Momentan liegt der Geomagnetpol der Nordhalbkugel nach dem IGRF-12 (International Geomagnetic Reference Field [*Thebault et al., 2015*]) bei $80,6^\circ$ N und $73,1^\circ$ W, also über dem amerikanischen Quadranten. Veränderungen im Magnetfeld führen zu einer ständigen Verschiebung der Pole, sodass die gegenwärtige Position nur eine Momentaufnahme darstellt. Verschiedene Modelle liefern jedoch unterschiedliche Positionen der Geomagnetpole (siehe Abbildung 2.4), weshalb eine unabhängige Rekonstruktion der Polposition für Vergleichszwecke von Interesse ist. Dazu kann die in dieser Arbeit entwickelte Methode herangezogen werden, mit deren Hilfe aus Polarlichtbeobachtungen die Position des Pols rekonstruiert werden kann (siehe Kapitel 4). Eine Übersicht über die verschiedenen in Grafik 2.4 verwendeten Modelle ist in Anhang A in Tabelle A.1 zu finden.

Eine besondere Bedeutung kommt dem *gufm1*-Modell [*Jackson et al., 2000*] zu. Dieses

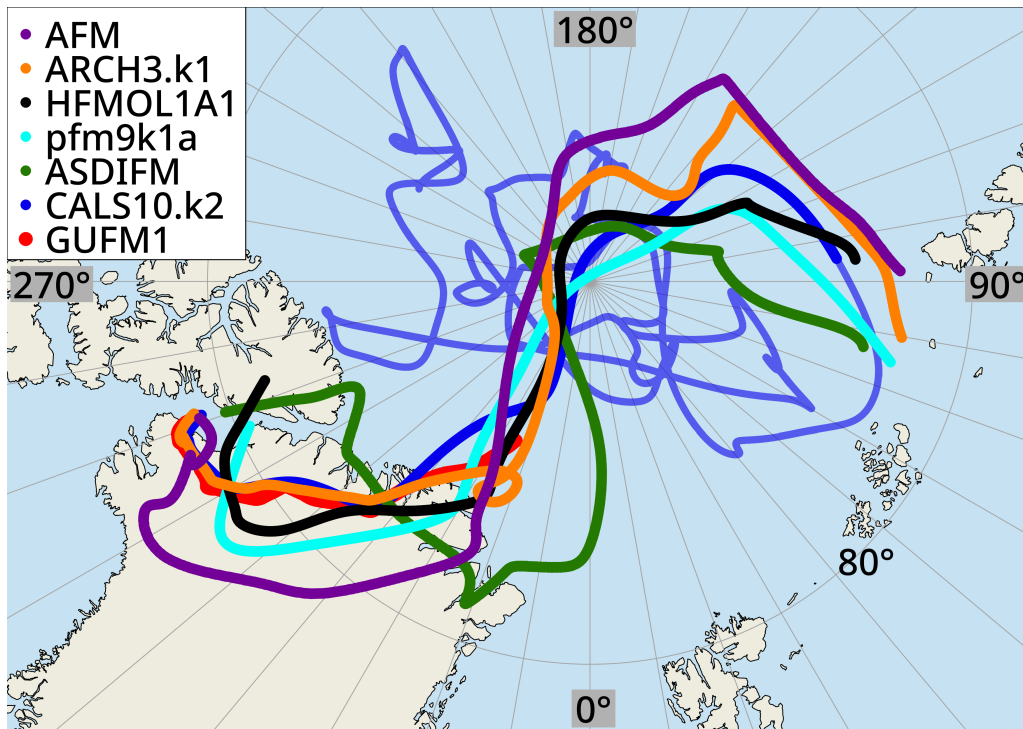


ABBILDUNG 2.4: Rekonstruktion der Lage des Geomagnetpols aus verschiedenen Modellen beginnend im Jahre 1000 n. Chr. (Ausnahme *gufm1* beginnend bei 1590). In transparentem Blau ist die Lage des Geomagnetpols nach dem CALS10k.2 Modell [Constable et al., 2016] zwischen den Jahren 8000 v. Chr. und 1000 n. Chr. dargestellt.

Modell reicht zurück bis ins Jahr 1590 und basiert auf direkten Messungen des Erdmagnetfeldes. Dabei wurden insbesondere Messungen von Handels- und Kriegsschiffen verwendet und auf eine sinnvolle Fehlerangabe sowie mögliche Positionsfehler geachtet. Letztere schlagen sich vor allem in der ungenauen Kenntnis der geografischen Länge nieder, wohingegen die Breite zumeist sehr gut bekannt war [Jackson et al., 2000]. Das *gufm1*-Modell liefert somit für die letzten ca. 400 Jahre eine gute Abschätzung der Position der Geomagnetpole. Daher werden einige der paläomagnetischen Modelle so konzipiert, dass sie für die letzten 400 Jahre den Verlauf der Pole aus dem *gufm1*-Modell widerspiegeln (zum Beispiel ARCH3.k1 und CALS10.k2 in Abbildung 2.4).

2.1.3 Messung des Magnetfeldes - Magnetische Indizes

Störungen des Erdmagnetfeldes können an magnetischen Observatorien gemessen werden. Dabei stehen verschiedene Kennziffern zur Verfügung, um das Level der Störung zu beschreiben. Geomagnetische Aktivität ist dabei als eine Variation des Erdmagnetfeldes definiert, die durch Wechselwirkung mit dem Sonnenwind entsteht. Andere Veränderungen sind per Definition keine magnetische Aktivität [Love, 2007]. Ein wichtiger Index

der globalen magnetischen Aktivität ist der Kp-Index (planetare Kennziffer), der vom GeoForschungsZentrum in Potsdam herausgegeben wird. Eingeführt wurde dieser 1949 von Julius Bartels. Es handelt sich um einen dreistündigen Index, der die Aktivität auf einer quasi-logarithmischen Skala von 0 bis 9 angibt, wobei 0 keine Aktivität und 9 starke Aktivität bedeutet [Love, 2007]. Die Skala ist weiterhin in Drittel unterteilt, um kleinere Variationen darstellen zu können. Dies wird mit einem Plus bzw. Minus hinter der Ziffer gekennzeichnet.

Der Kp-Index setzt sich als arithmetisches Mittel von 13 K-Indizes zusammen, die von ausgewählten magnetischen Observatorien gemessen werden (siehe Abbildung A.1 in Anhang A). Diese Observatorien messen alle drei Komponenten des magnetischen Feldvektors (zwei horizontale und eine vertikale Komponente). Hierbei wird die am stärksten gestörte horizontale Komponente in einem 3-Stunden-Intervall zur Berechnung des K-Index genutzt [Bartels et al., 1939]. Zur Erstellung dieses Index ist es wichtig, nur die Variationen zu berücksichtigen, die aus Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind resultieren. Lokale Veränderungen, die auch an Tagen ohne geomagnetische Aktivität vorkommen, müssen daher zunächst abgezogen werden [Love, 2007]. Dennoch handelt es sich bei dem K-Index nach wie vor um eine lokale Größe. Durch statistische Betrachtungen erstellte Julius Bartels Tabellen, die es erlaubten, die verschiedenen K-Indizes umzurechnen, woraus ein standardisierter Ks-Index für jedes Observatorium erzeugt wird. Diese Ks-Indizes können schlussendlich zum Kp-Index gemittelt werden.

Ein großer Vorteil ist, dass der Kp-Index bereits seit Mitte des 20. Jh. zur Verfügung steht. Thomsen [2004] erörtert, weshalb der Kp-Index stark mit der Größe des Auroraovals zusammenhängt und wieso er eine gute Kenngröße für die magnetische Konvektion ist. Breitet sich das Auroraoval in Richtung des Äquators aus, so sind mehr und mehr der 13 Stationen, die den K-Index bestimmen, in der Nähe der elektrischen Polarlichtströme. Daher wird das gemessene Störungslevel erhöht, weshalb der Kp-Index genutzt werden kann, um den Rand der Plasmaschicht zu studieren. Weitere Eigenschaften, die mit dem Kp-Index zusammenhängen, sind zum Beispiel die Größe der Plasmaschicht und die Stärke der ionosphärischen Ströme.

Der Nachteil des Kp-Index liegt darin, dass er nicht geeignet ist kurzzeitige Variationen des Feldes zu messen, wie sie etwa bei geomagnetischen Teilstürmen vorkommen. Dies liegt darin begründet, dass der Teilsturmzyklus eine Periode von etwa 3 h aufweist und daher mit der Genauigkeit des Kp-Index zusammenfällt. Die vorliegende Arbeit befasst sich allerdings mit Veränderungen auf größeren Zeitskalen, weshalb dieser Effekt nicht ins Gewicht fällt.

Wie von Sabine [1852] festgestellt, fallen Maxima und Minima der mittleren jährlichen Häufigkeit geomagnetischer Stürme mit den Maxima und Minima zusammen, die Schwa-

be beim Auswerten der Sonnenfleckenzahlen entdeckte [Schwabe, 1844]. Es gelang Sabine [1852] auch aus magnetischen Daten den ca. 11-jährigen Sonnenzyklus abzuleiten. Folglich kann der Kp-Index genutzt werden, um die Sonnenaktivität zu studieren (siehe Abbildung 2.5). Ein Vergleich zwischen dem aa-Index und der mittleren jährlichen Sonnenfleckenzahl findet sich in Anhang A in Abbildung A.2.

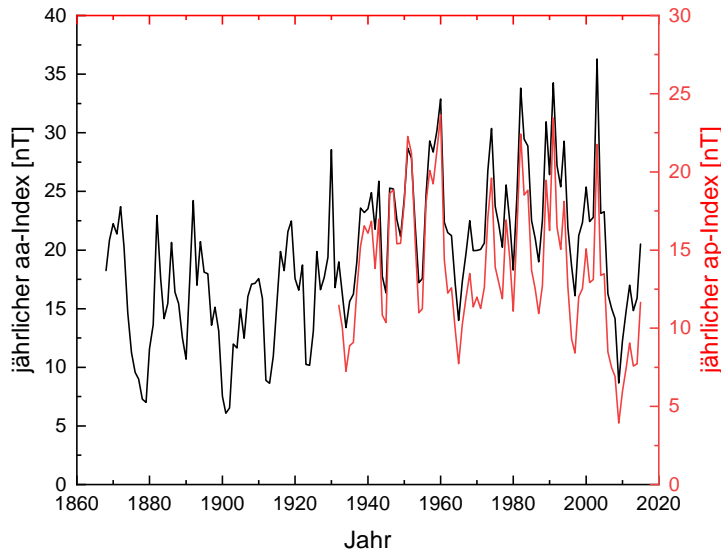


ABBILDUNG 2.5: Jährlicher mittlerer aa- und ap-Index. Beide Indizes zeigen den Aktivitätszyklus der Sonne.

Störung von 800 nT. Auch der aa-Index spielt eine wichtige Rolle. Dieser wird, wie der Kp-Index, aus den K-Indizes der jeweiligen Stationen berechnet, wobei hier nur zwei Stationen verwendet werden. Dabei ist eine Station fast exakt die Antipode der zweiten Station. Aktuell sind dies die magnetischen Observatorien in Hartland und Canberra [Lockwood et al., 2018]. Dieser Index ist bereits seit 1868 verfügbar und bietet eine gute Möglichkeit die Aktivität der Sonne zu untersuchen [Delaygue und Bard, 2011].

Weitere Indizes sind direkt mit den im Polarlichtoval fließenden Strömen verknüpft und sollen genauer in Kapitel 2.3.2 erklärt werden.

2.2 Sonne und Sonnenwind

Unsere Sonne ist ein Hauptreihenstern des Spektraltyps G2 mit einer absoluten V-Band Helligkeit von etwa 4,81 mag [Willmer, 2018]. Im Kern der Sonne wird Wasserstoff zu Helium fusioniert, wodurch große Mengen an Energie freigesetzt werden. An diesen Kern schließen sich die Strahlungs- und Konvektionszone an [Kamide et al., 2007], wobei letzte-

Einige weitere Indizes sind eng mit dem Kp-Index verwandt. Darunter der ap-Index, mit dessen Hilfe die Skala des Kp-Index linear ausgedrückt werden kann. Er beschreibt die meist gestörte horizontale Komponente des Feldes in einem 3-Stunden-Intervall, welche ein Observatorium bei 50° geomagnetischer Breite messen würde (Einheit in 2 nT). Zur Umrechnung zwischen Kp- und ap-Index stehen von Bartels erstellte Tabellen zur Verfügung. Dabei beschreibt zum Beispiel ein Kp-Index von 9+ eine magnetische

re eine differentielle Rotation aufweist, die von Carrington entdeckt wurde [Carrington, 1859b]. Als differentielle Rotation wird eine von der heliografischen Breite abhängige Rotationsperiode bezeichnet. Diese beträgt am Äquator etwa 26 Tage, wohingegen die Polregionen ca. 37 Tage für einen vollen Umlauf benötigen [Kamide *et al.*, 2007]. Diese differentielle Rotation hat Auswirkungen auf das Magnetfeld der Sonne, welches, wie auch das Erdmagnetfeld, durch Dynamoprozesse erzeugt wird [Hanslmeier *et al.*, 2009]. Die Auswirkung der differentiellen Rotation auf das solare Magnetfeld resultiert im Auftreten des etwa 11-jährigen quasi-periodischen Sonnenaktivitätszyklus, welcher von Samuel Heinrich Schwabe bei der Auswertung von Sonnenfleckenzahlen entdeckt wurde [Schwabe, 1844]. Auf diesen Aktivitätszyklus und die verschiedenen Beobachtungsmöglichkeiten soll im folgenden Abschnitt genauer eingegangen werden.

2.2.1 Variationen der Sonnenaktivität

Der Aktivitätszyklus der Sonne hängt stark mit der Morphologie des solaren Magnetfeldes zusammen. Ausgehend von einer poloidalen Konfiguration führt die differentielle Rotation der Sonne zu einem Eindrehen der Magnetfeldlinien, sodass ein toroidales Feld erzeugt wird. Durch Wechselwirkungen des toroidalen Feldes mit dem fließenden Plasma in der Konvektionszone kann schließlich wieder eine poloidale Konfiguration erzeugt werden. Wie im Falle des Erdmagnetfeldes wird vom ω - bzw. α -Effekt gesprochen. Diese beiden Effekte geben in erster Linie die großräumigen Strukturen des solaren Magnetfeldes wieder und können kleinräumige Strukturen nicht beschreiben [Bushby und Mason, 2004].

Sonnenflecken. Ein Resultat dieses großräumigen Feldes sind die Sonnenflecken. Dabei handelt es sich um kältere und somit dunklere Bereiche der Photosphäre, die entstehen, wenn Magnetfeldlinien die Photosphäre durchstoßen. In diesem Bereich ist die sogenannte Granulation, also die Struktur der kleinräumigen Konvektion, unterdrückt, wodurch das Plasma hier kälter ist [Weiss, 2006]. In Zeiten des Sonnenmaximums (höchste solare Aktivität), in denen das Magnetfeld eine komplexere Struktur aufweist, sind Sonnenflecken häufiger, wohingegen sie nahe des Sonnenminimums seltener auftreten. Sonnenflecken sind somit ein guter Indikator für die Sonnenaktivität. Zur Darstellung wird für gewöhnlich die jährlich gemittelte Zürich Sonnenfleckenzahl verwendet [Hoyt und Schatten, 1998]. Berechnet wird sie über die Formel

$$R = k(10 N_G + N_S), \quad (2.5)$$

wobei N_G die Anzahl der Fleckengruppen beschreibt und N_S die Zahl isolierter Flecken. Der Vorfaktor 10 ergibt sich aus der mittleren Anzahl an Flecken pro Gruppe, wohingegen der Faktor k abhängig vom jeweiligen Beobachter ist [Clette et al., 2014].

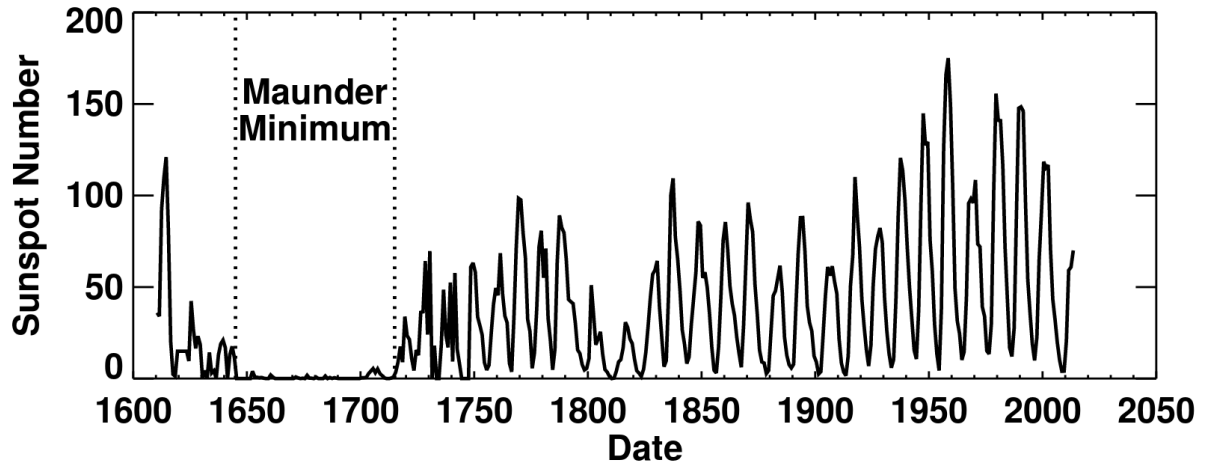


ABBILDUNG 2.6: Darstellung der mittleren jährlichen Gruppenzahl. Zu erkennen ist der etwa 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne, welcher von Schwabe entdeckt wurde. Aus Hathaway [2015].

Abbildung 2.6 offenbart einen großen Vorteil in der Verwendung der Sonnenfleckenzahl zur Untersuchung des Aktivitätszyklus, nämlich die lange Verfügbarkeit. Teleskopisch werden sie seit etwa 400 Jahren beobachtet [Weiss, 2006], wobei Beobachtungen mit dem bloßen Auge noch länger zurückreichen. Diese lange Zeitreihe zeigt, dass der Schwabezyklus gewissen Schwankungen unterworfen ist. Zum einen variieren die Maxima in ihrer Stärke und zum anderen gibt es Zeiten sehr schwacher Sonnenaktivität, bei denen der Zyklus teilweise oder komplett unterdrückt scheint. Diese Zeiträume werden als “große Minima” bezeichnet. Abbildung 2.6 zeigt dabei das Maunder-Minimum von 1645 bis 1715 [Clette et al., 2020]. Zudem ist das Dalton-Minimum zwischen 1793 und 1827 zu sehen [Clette et al., 2020]. Beide Minima unterscheiden sich sowohl in ihrer Tiefe, als auch in ihrer Länge. Daher wird nach neusten Erkenntnissen das Dalton-Minimum als sekuläres und nicht als großes Minimum bezeichnet [Vaquero et al., 2016]. Um den Aktivitätszyklus der Sonne und die großen Minima zu verstehen, ist eine lange homogene Zeitreihe der Sonnenaktivität erforderlich. Die Forderung nach Homogenität bereitet jedoch im Falle der Sonnenflecken Probleme. Über die Jahrhunderte haben verschiedene Beobachter die Sonnenfleckenzahl herausgegeben, die beispielsweise unterschiedliche Instrumente benutzten. Um dies auszugleichen wurde der Faktor k in Gleichung 2.5 eingeführt. Dennoch gibt es Inhomogenitäten bei den Übergängen der einzelnen Beobachter [Clette et al., 2014], weshalb eine Aussage über die Langzeitaktivität der Sonne fehlerbehaftet sein könnte. Zudem verweisen Delaygue und Bard [2011] darauf, dass die im Folgenden dargestellten radioak-

tiven Isotope auch im Maunder-Minimum weiterhin einen Zyklus zeigen, wohingegen dort fast keine Sonnenflecken beobachtet wurden. Dies könnte auch damit zusammenhängen, dass bisher nicht alle Beobachtungen gefunden und ausgewertet wurden.

Kosmogene Isotope. Neben den Sonnenflecken gibt es weitere Methoden, die vergangene Sonnenaktivität zu beurteilen. Eine Möglichkeit ist die Nutzung der radioaktiven Isotope ^{14}C und ^{10}Be . Diese werden durch kosmische Strahlung in der oberen Atmosphäre erzeugt und über verschiedene Prozesse eingelagert. So findet sich ^{14}C in Baumringen, weshalb hier eine Zeitauflösung von einem Jahr möglich ist und zudem die Datierung recht genau ist [Stuiver und Quay, 1980]. ^{10}Be hingegen wird in Eis abgelagert und kann so mittels Bohrkernen extrahiert werden. Die Datierung gestaltet sich hier um ein Vielfaches komplizierter und auch die Zeitauflösung ist mit bis zu einigen Jahrzehnten ungenauer. Dadurch kann der Schwabezyklus im ^{10}Be mitunter nicht aufgelöst und nur der allgemeine Langzeittrend der Sonnenaktivität untersucht werden [Delaygue und Bard, 2011]. Beiden Isotopen ist gemein, dass sie durch kosmische Strahlung produziert werden. Diese ist durch den Sonnenwind in dem Sinne moduliert, dass ein starker Sonnenwind während des Sonnenmaximums die Menge an eindringender kosmischer Strahlung vermindert, was zu einer Abnahme der ^{14}C und ^{10}Be Produktion führt. Während des Sonnenminimums gilt dies umgekehrt. Mittels der kosmogenen Isotope können Zeitreihen der Sonnenaktivität über mehrere Jahrtausende erstellt werden [Delaygue und Bard, 2011]. Zudem gelang es Solanki et al. [2004] die Zeitreihe der Sonnenfleckenzahlen mittels ^{14}C über die letzten 11 000 Jahre auszudehnen, um die hohe Sonnenaktivität der letzten Jahrzehnte einschätzen zu können und mit länger zurückliegenden Phasen zu vergleichen. Dabei fanden Solanki et al. [2004] heraus, dass zuletzt vor über 8000 Jahren eine Phase ähnlich hoher Sonnenaktivität auftrat.

Ungenauigkeiten bei der Nutzung der kosmogenen Isotope entstehen zum einen aus den Einlagerungsmechanismen, die insbesondere im Falle von ^{14}C nicht genau bekannt sind, zum anderen hat das Wirken der Menschen im letzten Jahrhundert zu einer Veränderung der relativen ^{14}C - Menge geführt. Dies geschah durch Verbrennung fossiler Brennstoffe und der damit verbundenen Anreicherung der Atmosphäre mit ^{12}C . Dieser Effekt wird als Suess-Effekt bezeichnet [Solanki et al., 2005]. Des Weiteren haben Explosionen von Kernwaffen zu einer zusätzlichen Produktion von ^{14}C geführt, weshalb die kosmogenen Isotope seit etwa 1900 nicht mehr zur Untersuchung der Sonnenaktivität genutzt werden können [Delaygue und Bard, 2011].

Magnetische Indizes. Delaygue und Bard [2011] verweisen darauf, dass der geomagnetische aa-Index einer der besten Indizes ist, um die Veränderung in der solaren magne-

tischen Aktivität zu untersuchen. Dieser Index wurde bereits in Kapitel 2.1.3 eingeführt. Der aa-Index ist allerdings erst seit 1868 verfügbar, was ihn zum Untersuchen der Langzeitveränderungen der Sonnenaktivität unbrauchbar macht. Es wäre also von Interesse die magnetischen Indizes, wie den Kp- oder aa-Index, über andere Methoden für längere Zeiträume zu rekonstruieren.

2.2.2 Sonnenwind und IMF

Der Sonnenwind ist ein kontinuierlicher von der Sonne ausgehender Teilchenstrom, der seinen Ursprung im Druckunterschied zwischen der Korona und dem interplanetaren Raum hat [Kamide *et al.*, 2007]. Die Geschwindigkeit des Sonnenwindes nimmt mit steigendem Abstand zunächst zu, da die thermische Energie des Plasmas zunehmend an Gewicht gegenüber den magnetischen und gravitativen Kräften gewinnt. Dadurch wird der Sonnenwind ab etwa 5 bis 6 Sonnenradien² überschallschnell [Bone, 1996]. Durch Beobachtungen solarer Ausbrüche und den resultierenden Effekten auf der Erde wurde anhand der Transitzeit klar, dass der Sonnenwind eine Geschwindigkeit in der Größenordnung von 1000 km/s besitzt. Schon 1919 wurde bemerkt, dass die Anzahl der Elektronen und Protonen im Sonnenwind gleich sein muss, da die Sonne sonst ein gewaltiges elektrostatisches Potential aufbauen würde [Kamide *et al.*, 2007]. Der Sonnenwind besteht im Wesentlichen aus Elektronen und Protonen sowie etwa 5 % Heliumionen. Die daraus resultierende hohe Leitfähigkeit bewirkt, dass das solare Magnetfeld im Sonnenwind “eingefroren” ist. Durch den sich ausbreitenden Sonnenwind wird auch das Magnetfeld der Sonne in den interplanetaren Raum hinaus getragen, weshalb vom interplanetaren magnetischen Feld oder kurz IMF gesprochen wird. Typische Elektronendichten des Sonnenwindes in Erdnähe liegen bei 5 cm^{-3} , wobei die Elektronentemperatur in der Größenordnung von 10^5 K liegt. Das IMF hat nahe der Erde eine Stärke von 5 bis 10 nT [Schubert und Kono, 2007]. Abhängig von der Sonnenaktivität ändern sich die Parameter des Sonnenwindes.

2.3 Wechselwirkungen zwischen IMF und Erdmagnetfeld

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der Magnetosphäre und der Ionosphäre beschrieben. Zudem wird auf die verschiedenen elektrischen Stromsysteme eingegangen und die Kopplung zwischen Magnetosphäre und Ionosphäre erklärt. All dies ist erforderlich, um zu verstehen, wie Elektronen und Protonen des Sonnenwindes letztendlich bis in die obo-

²Der Sonnenradius beträgt $R_{\odot} = 695508 \text{ km}$ [Brown und Christensen-Dalsgaard, 1998].

re Atmosphäre vordringen können, wo schließlich die Polarlichter erzeugt werden. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist dabei das IMF. Dessen Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld ist entscheidend für das Eindringen der solaren Teilchen.

2.3.1 Magnetosphäre und Ionosphäre

Trifft der Sonnenwind auf das Erdmagnetfeld, so wird dieser hauptsächlich um die Erde herum gelenkt, da nur unter gewissen Bedingungen eine Verschmelzung zwischen IMF und Erdmagnetfeld möglich ist. Dabei bildet sich eine Art Hohlraum um die Erde, in dessen Inneren das Erdmagnetfeld dominiert [*Hanslmeier, 2007*]. Dieser Bereich wird als Magnetosphäre bezeichnet. Der überschallschnelle Sonnenwind wird auf der Tagseite der Erde abgebremst, was zur Ausbildung einer Bugstoßwelle führt. Die kinetische Energie der Teilchen wird in thermische Energie umgewandelt, weshalb das Plasma hinter der Bugstoßwelle heißer und dichter wird. Dieser Bereich, der auch durch ein stärkeres Magnetfeld gekennzeichnet ist, wird mit dem englischen Begriff “Magnetosheath” beschrieben. Die Grenze zwischen Magnetosheath und Magnetosphäre ist die Magnetopause. Die Wechselwirkung des Erdmagnetfeldes mit dem Sonnenwind führt zu einer Stauchung der Magnetosphäre auf der sonnenzugewandten Seite und zur Ausbildung eines Magnetfeldschweif auf der Nachtseite. Die verschiedenen hier erwähnten Bereiche sind in Abbildung 2.7 dargestellt. Das in der Magnetosphäre vorhandene Plasma besteht aus Elektronen und Protonen, die sowohl vom Sonnenwind als auch von der Ionosphäre stammen [*Schubert und Kono, 2007*].

Das Plasma innerhalb der Magnetosphäre ist in verschiedenen Bereichen gesammelt. Zu erwähnen ist hier die etwa 5 bis 10 Erdradien dicke Plasmaschicht, die sich nahe der Erde im Magnetfeldschweif befindet und bis in die polaren Regionen reicht. Die magnetischen Feldlinien in der Plasmaschicht werden als “geschlossen” angesehen, sind also nicht mit dem IMF verbunden. Typische Elektronendichten liegen im Bereich von $0,5 \text{ cm}^{-3}$ mit Elektronentemperaturen von einigen Millionen Kelvin [*Schubert und Kono, 2007*]. Im Vergleich dazu sind die Feldlinien in den Schweifkeulen (engl.: lobes) offen, was bedeutet, dass sie mit dem IMF verbunden sind [*Fear et al., 2014*].

Zum Entstehen der Polarlichter müssen solare Teilchen in die Magnetosphäre eindringen. Dazu muss das IMF mit dem Magnetfeld der Erde koppeln, was über den Prozess der magnetischen Rekonnexion geschieht (siehe Abbildung 2.8). Dabei verbinden sich entgegengesetzt gerichtet magnetische Feldlinien aus verschiedenen Regimen [*McPherron, 2020*]. Für gewöhnlich sind die Feldlinien im Plasma eingefroren, da die Leitfähigkeit, aufgrund mangelnder Stöße, nahezu unendlich ist. In bestimmten Bereichen, wie der Magnetopause oder dem Magnetfeldschwanz, kann die Leitfähigkeit jedoch einen endlichen

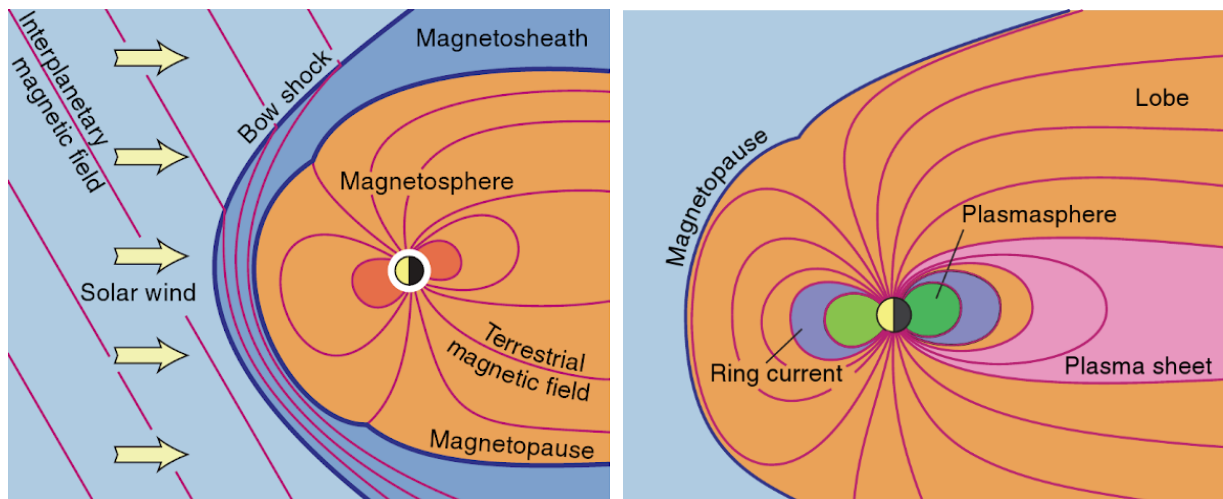


ABBILDUNG 2.7: Links: Magnetosphäre mit dem eintreffenden Sonnenwind. Beim Abbremsen des Sonnenwindplasmas bildet sich eine Bugstoßwelle aus. Das Plasma heizt sich auf und wird dichter. Dieser Bereich wird als Magnetosheath bezeichnet. Abgegrenzt durch die Magnetopause findet sich im Inneren die eigentliche Magnetosphäre. Zu erkennen ist, wie das IMF ohne Kopplung um das Erdmagnetfeld herumgelenkt wird (aus *Schubert und Kono* [2007]). Rechts: In der Magnetosphäre befindet sich die Plasmaschicht (Plasma sheet), wobei die Feldlinien als “geschlossenen” angesehen werden. Oberhalb und unterhalb der Plasmaschicht finden sich die Schweifkeulen (Lobe), deren Feldlinien “offen” sind (aus *Schubert und Kono* [2007]).

Wert annehmen und die Feldlinien können diffundieren [*Schubert und Kono*, 2007]. Die antiparallelen Feldlinien treffen sich an einem X-förmigen magnetisch neutralen Punkt (siehe blaues Kreuz in Abbildung 2.8) und können dort in einer neuen Konfiguration verschmelzen.

Die neu verbundenen Feldlinien bewegen sich senkrecht zu ihrer ehemaligen Einströmrichtung davon. Dabei wird Energie, welche im Magnetfeld gespeichert war, in kinetische Energie des Plasmas umgewandelt [*McPherron*, 2020]. Magnetische Rekonnexion zwischen dem IMF und dem Erdmagnetfeld tritt sowohl auf der sonnenzugewandten Seite der Erde, als auch auf der sonnenabgewandten Seite im Magnetfeldschweif auf. Wie bereits erwähnt, verschmelzen bei der Rekonnexion antiparallele Feldlinien. Grundsätzlich kann das IMF für alle Richtungen mit dem Erdmagnetfeld koppeln, wobei die Stärke und Orientierung des IMF von Strukturen auf der Sonnenoberfläche abhängt [*Bond et al.*, 1898]. Allerdings ist für eine starke Südwärtskomponente des IMF die Rekonnexionsrate maximal (siehe Gleichung 2.8), weshalb bei dieser Konfiguration (IMF antiparallel zum Erdmagnetfeld) die meiste Energie übertragen werden kann [*Lu et al.*, 2019]. Die nun mit dem IMF verbundenen Erdmagnetfeldlinien werden, aufgrund des sich weiter bewegenden Sonnenwindes, auf die Nachtseite der Erde transportiert, wo sich der Magnetfeldschweif

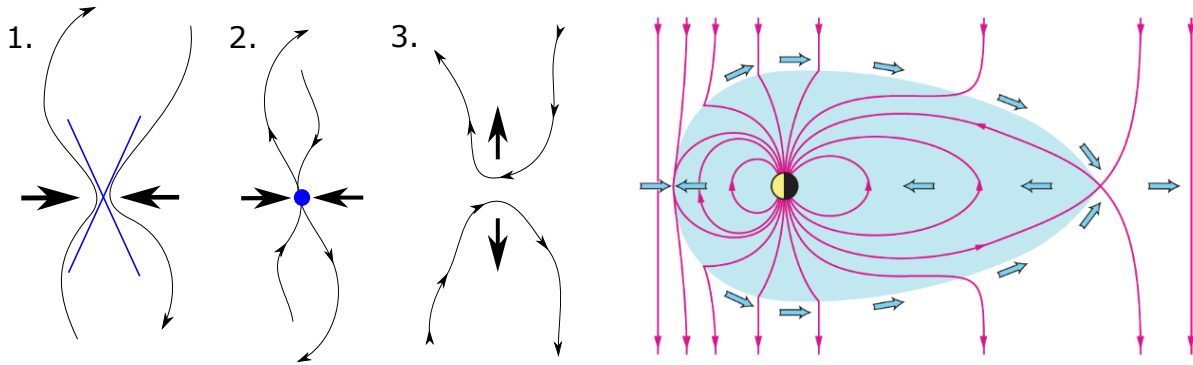


ABBILDUNG 2.8: Links: Ablauf der magnetischen Rekonnexion. Rechts: Bei der magnetischen Konvektion kommt es zur Rekonnexion zwischen IMF und terrestrischen Feldlinien. Letztere werden durch die Bewegung des Sonnenwindes auf die Nachtseite transportiert. Dort kommt es erneut zu Rekonnexion und die Erdmagnetfeldlinien lösen sich vom IMF. Anschließend wandern sie über den Bereich des Polarlichtovals wieder zur Tagseite [Schubert und Kono, 2007].

ausbildet. Dort treffen sich die Erdmagnetfeldlinien und es kommt erneut zur Rekonnexion, sodass sich die terrestrischen Feldlinien wieder verbinden. Somit sind die Erdfeldlinien wieder geschlossen, liegen aber in einer gestreckten Form vor. Die magnetische Spannung wird schließlich abgebaut und die Feldlinien bewegen sich in Richtung Erde, wobei das Plasma den Feldlinien folgt. Dieser Prozess wird als magnetische Konvektion bezeichnet und ist in Abbildung 2.8 zu sehen [Schubert und Kono, 2007].

Unterhalb der Magnetosphäre schließt sich die Ionosphäre an, die in verschiedene Schichten eingeteilt wird. Durch starke UV- sowie Röntgenstrahlung der Sonne können Elektronen aus ihren Atomen herausgelöst werden. Ab einer Höhe von etwa 60 km kommt es aufgrund der zu geringen Teilchendichte nicht zur Rekombination, weshalb permanent freie Ladungsträger vorliegen. Im Bereich der unteren Ionosphäre ist nur ein geringer Anteil des Gases ionisiert. Dennoch ist dieser Teil der Atmosphäre elektrisch leitend und starke Ströme ($\sim 10^6$ A) wie die Polarlicht-Elektrojets können sich bilden. Diese werden in Abschnitt 2.3.2 noch genauer betrachtet. Mit zunehmender Höhe werden mehr und mehr Teilchen ionisiert, bis letztendlich kein neutrales Teilchen mehr vorhanden ist [Heise, 2002]. Dieser Bereich wird als Plasmasphäre bezeichnet und liegt torusförmig um die Erde. Zwischen Ionosphäre und Plasmasphäre findet also ein kontinuierlicher Übergang statt [Schubert und Kono, 2007].

Die Ionosphäre wird weiterhin in verschiedene Schichten unterteilt, die sich vor allem in ihrer Elektronendichte unterscheiden. Da der Ionisationsgrad stark sonneneinstrahlungsabhängig ist, verändern sich diese Schichten im Laufe des Tages, aber auch mit dem Level der Sonnenaktivität.

2.3.2 Magnetosphären - Ionosphären - Kopplung

Im vorherigen Kapitel wurde der Effekt der magnetischen Konvektion beschrieben, bei dem terrestrische Feldlinien durch Kopplung an das IMF auf die Nachtseite transportiert werden. Da die Feldlinien der Erde durch die Ionosphäre hindurch laufen, tritt auch hier eine Konvektionsbewegung auf. Die Bewegung erfolgt über die Polkappen (weißer Bereich in Abbildung 2.9 links) hin zur Nachtseite und über den Abend- und Morgensektor bei hohen Breiten, innerhalb des Polarlichtovals (grüner Bereich in Abbildung 2.9 links), wieder zurück.

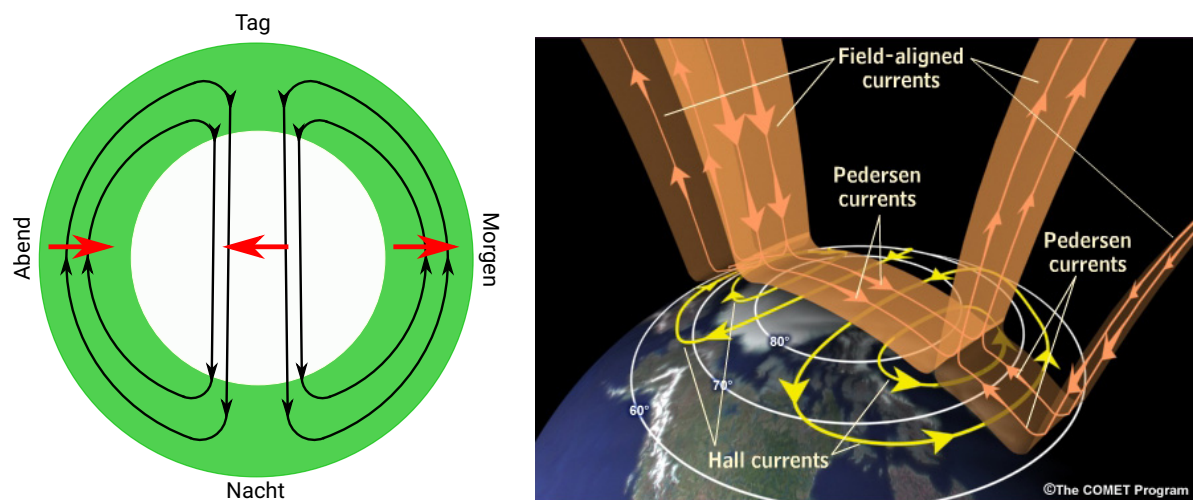


ABBILDUNG 2.9: Links: Bei der ionosphärischen Konvektion werden die terrestrischen Feldlinien aufgrund des Sonnenwindes bewegt (die schwarzen Linien zeigen die Bewegung an). Daraus resultieren elektrische Felder, die mittels roter Pfeile gekennzeichnet sind [Schubert und Kono, 2007]. Rechts: In der Ionosphäre finden sich aufgrund der entstehenden elektrischen Felder Hall-Ströme sowie Pederson-Ströme. Die eigentliche Verbindung zwischen Magnetosphäre und Ionosphäre kommt durch die feldparallelen Ströme zustande, die auch Birkelandströme genannt werden (<https://www.colorado.edu/lab/matsuo/research/earthcube-assimilative-mapping-geospace-observations>).

Trifft der Sonnenwind auf die Magnetosphäre, werden durch die Lorentzkraft Protonen auf die Morgenseite und Elektronen auf die Abendseite transportiert. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld vom Morgen- zum Abendsektor, welches teilweise durch einen Strom quer durch den Magnetfeldschweif abgebaut wird. Ein anderer Teil des Stroms fließt durch feldparallele Ströme, auch Birkelandströme genannt, im Morgensektor in die Ionosphäre hinein und auf der Abendseite durch weitere feldparallele Ströme wieder in die Magnetosphäre [Akasofu, 2009]. Dies sind die Region-1-Birkelandströme, welche in Abbildung 2.9 durch die “field-aligned currents” am polnahen Auroraovalrand verdeutlicht werden. Durch die erhöhte Leitfähigkeit in der Ionosphäre kann ein Strom quer zu den Magnetfeldlinien fließen. Am jeweils äquatornahen Rand des Polarlichtovals ist die Leitfähigkeit

wieder vermindert, weshalb hier der Strom entlang von Region-2-Birkelandströmen aus der Ionosphäre hinaus (Morgensektor) bzw. hinein (Abendsektor) fließt [Akasofu, 2009]. Das dabei entstehende elektrische Feld ist rechts in Abbildung 2.9 durch die roten Pfeile innerhalb des Auroraovals gekennzeichnet [Schubert und Kono, 2007]. Die Flussrichtung der Elektronen, die hauptsächlich aufgrund der geringeren Trägheit den Strom tragen, ist entgegengesetzt zur Stromrichtung. Innerhalb des Polarlichtovals stehen die magnetischen Felder senkrecht auf dem elektrischen Feld. In einem solchen Fall wirkt auf geladene Teilchen erneut die Lorentzkraft, wobei eine Driftbewegung senkrecht zum Magnetfeld sowie senkrecht zum elektrischen Feld entsteht ($\vec{E} \times \vec{B}$ - Drift). In dünneren Schichten der Atmosphäre driften Elektronen und Protonen in die gleiche Richtung, weshalb kein Strom entsteht. In dichteren Atmosphärenschichten sind Stöße der Protonen allerdings so häufig, dass sie in ihrer Drift gestört werden. Infolgedessen entsteht ein Strom, welcher Hall-Strom genannt wird [Schubert und Kono, 2007] (siehe Abbildung 2.9). Dieser steht, wie zuvor erwähnt, sowohl senkrecht auf dem Magnetfeld als auch senkrecht auf dem elektrischen Feld. Die Hall-Ströme erzeugen die Aurora-Elektrojets, die im Weiteren noch genauer erklärt werden. Der Strom parallel zum elektrischen Feld und senkrecht zum Magnetfeld wird Pederson-Strom genannt. Im Folgenden soll auf einige Ströme genauer eingegangen werden.

Aurora-Elektrojet. Die Leitfähigkeit im Polarlichtoval ist gegenüber jener in der polaren Kappe infolge der eindringenden Teilchen stark erhöht. Daher konzentriert sich der Stromfluss in hohen Breiten vornehmlich im Bereich des Auroraovals. Dort kommt es zur Ausbildung der Aurora-Elektrojets. Als Jets werden räumlich eng begrenzte, intensive Ströme innerhalb der Ionosphäre bezeichnet. Die Elektrojets sind die stärksten Ströme im Auroraoval und haben mit einigen Millionen Ampere eine ähnliche Stromstärke wie der irdische Ringstrom. Allerdings fließen die Aurora-Elektrojets in lediglich 100 km Höhe, weshalb sie in Gestalt von magnetischen Störungen großen Einfluss nahe der Erdoberfläche haben. Diese Störungen können im Falle von starken Geomagnetstürmen bis zu $3 \mu\text{T}$ betragen, was etwa 7 % der mittleren Feldstärke an der Oberfläche entspricht. Zunächst wird auf die konvektiven Elektrojets eingegangen. Diese sind Hall-Ströme, welche auf der sonnenzugewandten Seite durch Birkelandströme mit Teilchen versorgt werden. Von dort aus fließt ein ostwärts gerichteter Elektrojet über den Abendsektor, bis er vor dem Mitternachtssektor auf den westwärts gerichteten Elektrojet trifft, der von der Tagseite aus über den Morgensektor in Richtung Mitternacht fließt.

Die Elektrojets werden von magnetischen Observatorien gemessen, die zwischen 65° und 70° magnetischer Breite, also innerhalb des Auroraovals, liegen. Unterschieden wird zwischen dem AU-, AL- und AE-Index. Erstere beschreiben den maximalen ostwärts bzw.

westwärts gerichteten Strom, wohingegen AE die gesamte Stromstärke angibt [Schubert und Kono, 2007].

Teilsturm-Elektrojet. Dieser Elektrojet fließt, wie die zuvor erwähnten konvektiven Elektrojets, innerhalb des Polarlichtovals. Durch ein Ungleichgewicht zwischen Rekonnektion auf der Tag- und Nachtseite tragen mehr und mehr Feldlinien zum Magnetfeldschweif bei. Nach einiger Zeit (~ 10 min) kommt es zu einer plötzlichen Rekonnexion der Feldlinien auf der Nachtseite in einer Entfernung von 20 - 25 R_E . Die magnetische Energie wird schlagartig freigesetzt und führt zu einer erheblichen Verstärkung der Ströme zwischen Magneto- und Ionosphäre gepaart mit starken Polarlichtern [Schubert und Kono, 2007]. Ein Teilsturm beginnt mit einer vermehrten Rekonnexion auf der Tagseite infolge einer starken Südkomponente des IMF. Der magnetische Fluss wird Richtung Nachtseite transportiert und nur teilweise über direkte Rekonnexion und anschließende Konvektion wieder abgebaut. Ein Teil des Flusses wird also im Magnetfeldschweif gespeichert. Nach etwa einer halben bis einer Stunde ist die magnetische Energie so groß, dass der Magnetfeldschweif instabil wird und die aufgestaute Energie freigesetzt wird. Dies ist verbunden mit dem Beginn eines Teilsturms, gefolgt von der Expansionsphase. Die freigesetzte Energie führt zum Ausbilden des Teilsturm-Elektrojets, der einen westwärts gerichteten Strom im Mitternachtssektor darstellt. Die Stromstärke wird großteils von einer erhöhten Leitfähigkeit der Ionosphäre bestimmt, die von der Anzahl der eindringenden Teilchen abhängt. Im Gegensatz zu den konvektiven Elektrojets ist der Teilsturm-Elektrojet räumlich auf den Mitternachtssektor beschränkt und auch die Ströme parallel zum Magnetfeld sind räumlich begrenzt. Ein Vergleich zwischen den konvektiven und Teilsturm-Elektrojets ist in Abbildung 2.10 dargestellt [Schubert und Kono, 2007].

Neben diesen Stromsystemen, gibt es weitere Ströme bei geringeren Breiten. Hier soll eine Beschränkung auf den Ringstrom erfolgen, da aus diesem ein weiterer Index der magnetischen Aktivität ableitbar ist.

Ringstrom. Infolge der westwärts gerichteten Bewegung eingefangener Ionen sowie der entgegengesetzten Bewegung gefangener Elektronen wird ein Stromsystem erzeugt, welches erheblichen Einfluss auf das Erdmagnetfeld haben kann. Die Stärke der Störung ΔB kann durch die Dessler-Schopke-Parker-Relation bestimmt werden und verbindet die Gesamtenergie des Ringstroms mit der Störung des Erdmagnetfeldes. Es gilt:

$$\Delta B = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{U_{ring}}{B_{eq} R_E^3}. \quad (2.6)$$

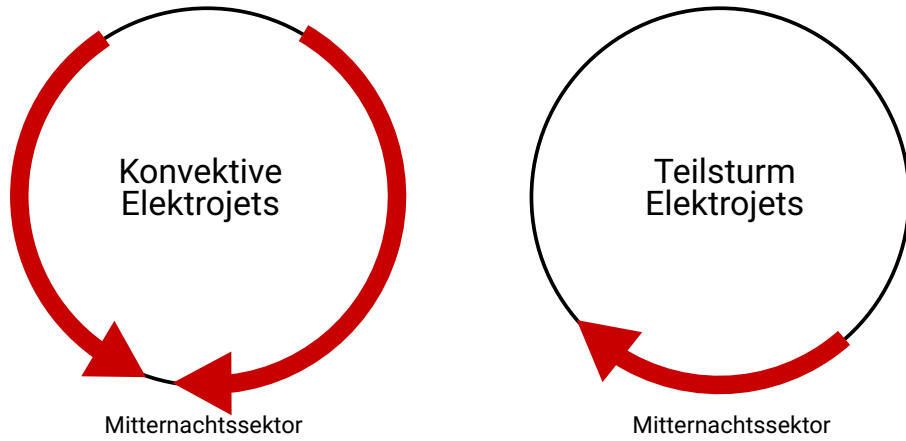


ABBILDUNG 2.10: Links: Konvektive Elektrojets in rot. Zu erkennen ist der über den Abendsektor fließende Ostwärtsjet sowie der über den Morgensektor fließende Westwärtsjet. Rechts: Der rote Pfeil stellt den Teilsturm-Elektrojet dar, der räumlich auf den Mitternachtssektor beschränkt ist und westwärts fließt. Nach *Schubert und Kono* [2007].

Hierbei ist U_{ring} die Gesamtenergie aller zum Ringstrom beitragenden Teilchen, B_{eq} das äquatoriale Magnetfeld an der Erdoberfläche und R_E der Erdradius.

Die Energie des Ringstroms ist abhängig von der Anzahl der Teilchen. Zu bestimmten Zeiten, die mit geomagnetischen Stürmen korrelieren, werden mehr Partikel vom Magnetfeldschweif in den Ringstrom injiziert. Die damit einhergehende Abschwächung des Magnetfelds kann mit magnetischen Observatorien nahe des Äquators beobachtet werden. Die Unterdrückung des Erdfeldes kann durch den Dst-Index (disturbed storm time) repräsentiert werden. Hierbei messen vier Observatorien die horizontale Nordkomponente des Feldes. Arithmetisches Mitteln über eine Stunde und über alle vier Stationen liefert schließlich den Dst-Index. Abbildung 2.11 zeigt den Dst-Index für Juli 2000. Am 15.07. wird eine Abnahme der Feldstärke um etwa 300 nT deutlich, welche einen Geomagnetsturm anzeigt. Bei geomagnetischen Stürmen sind zwei Phasen erkennbar. Zunächst werden immer mehr Teilchen in die innere Magnetosphäre transportiert und der starke Ringstrom bildet sich aus. Nach circa einem Tag nimmt die Rate der eindringenden Teilchen wieder ab. Daraufhin verliert der Ringstrom über einige Tage Partikel, bis das normale Level wieder eingestellt ist [Schubert und Kono, 2007].

In *Yokoyama et al.* [1998] wird beschrieben, wie die geomagnetisch äquaturnächste Polarlichtposition genutzt werden kann, um den Dst-Index abzuschätzen. Es gilt

$$\text{Dst} \propto L_e^{-3}, \quad (2.7)$$

wobei L_e mit der geomagnetischen Breite ϑ der äquaturnahen Grenze des Polarlichtovals über $L_e = 1/\cos^2 \vartheta$ zusammenhängt und L_e die geomagnetische Breite der Grenze des

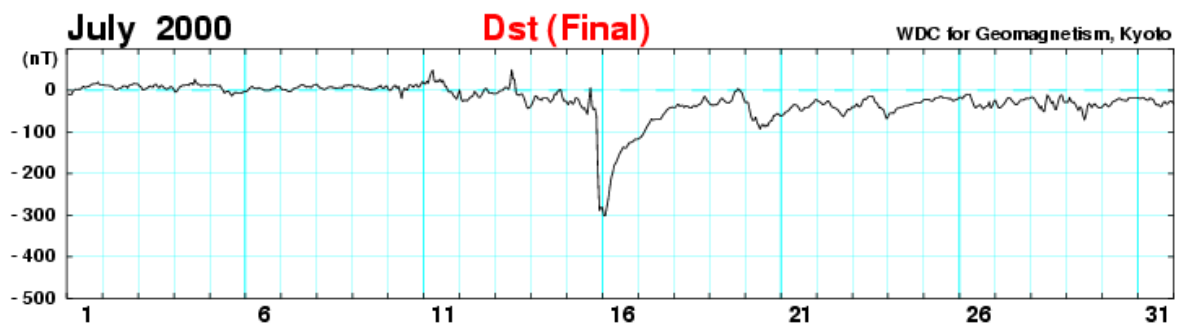


ABBILDUNG 2.11: Dst-Index für Juli 2000. Um den 15.07.2000 ist deutlich die Unterdrückung des Erdmagnetfeldes um etwa 300 nT zu erkennen (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/200007/index.html).

Elektronenniederschlags angibt. Die geomagnetisch äquatornächste Polarlichtposition für einen bestimmten Sturm kann also Aufschluss über den Dst-Index geben.

2.4 Die Polarlichter

Da in der vorliegenden Dissertation zur Rekonstruktion des Polarlichtovals historische Aurorasichtungen genutzt werden, soll in diesem Abschnitt zunächst kurz auf die Geschichte der Polarlichtforschung eingegangen werden. Dies ist erforderlich, um den jeweiligen Kenntnisstand der Menschen in die Interpretation der historischen Quellen mit einzubeziehen. Es wird gezeigt, welche Theorien über die Entstehung der Polarlichter sich über die Jahre entwickelten und welche wissenschaftlichen Fortschritte und Erkenntnisse schließlich zu der heute gängigen Theorie führten. Auf die moderne Sichtweise über die Polarlichter und deren Entstehung wird in Abschnitt 2.4.2 eingegangen.

2.4.1 Geschichte der Polarlichtforschung

Polarlichter begeistern und verängstigen die Menschheit seit jeher. In nordischen Kulturen wie etwa den Inuit sind Aurorae fester Bestandteil der Folklore. Für die Inuit im Gebiet der Hudsonstraße zum Beispiel sind Nordlichter die Fackeln der Geister, die die kürzlich Verstorbenen ins Paradies führen [Holzworth, 1974]. Polarlichter spielten aber nicht nur bei Kulturen der Nordhalbkugel eine wichtige Rolle. Hamacher [2013] untersuchte, welche Rolle die Aurora Australis in der Kultur der Aborigines gespielt hat.

Im Mittelalter wurden die Leuchterscheinungen oft als negative Vorboten gedeutet. In zeitgenössischen Berichten ist oft von Kämpfen im Himmel, Blut sowie Feuer die Rede [Bone, 1996]. Bereits im griechischen Altertum wurden erste Theorien über die Ursache

der Polarlichter aufgestellt. So beschrieb Aristoteles (385 v. Chr. - 323 v. Chr.), dass aufsteigender Dampf sich in der Atmosphäre entzünden könnte, was zu den Leuchterscheinungen führt [Gohlke, 1847].

Mit Beginn des 17. Jh. wurde sich letztendlich der modernen Sichtweise schrittweise angenähert. Pierre Gassendi (1592 - 1655) konnte im September 1621 ein Polarlicht bewundern und prägte daraufhin den noch heute gängigen Namen “Aurora Borealis” für das nördliche Polarlicht. Andere Bereiche der Wissenschaft, welche zum Verständnis der Polarlichter unerlässlich sind, machten ebenfalls große Fortschritte. So vermutete William Gilbert (1544 - 1603), dass das Magnetfeld der Erde als Dipolfeld eines riesigen Stabmagneten angenommen werden kann. Edmond Halley (1656 - 1742), der großes Interesse am Erdmagnetismus hatte, ging davon aus, dass die strahlenartige Struktur der Polarlichter durch Teilchen erzeugt wird, die sich entlang der magnetischen Feldlinien bewegen.

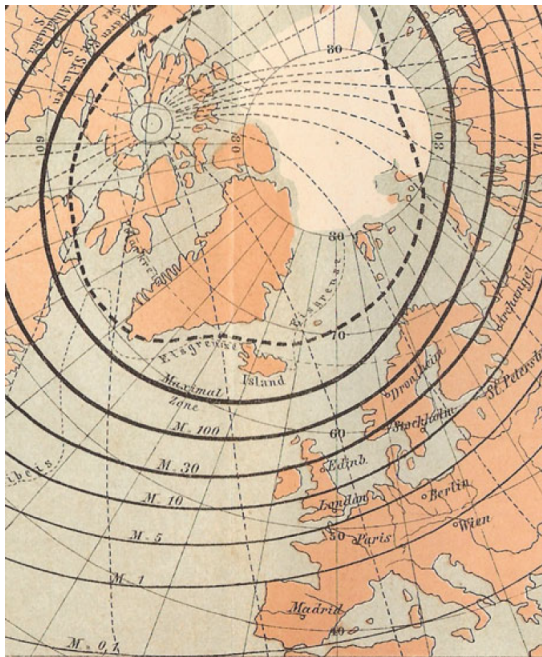


ABBILDUNG 2.12: Dargestellt ist die Häufigkeit von Polarlichtern pro Jahr. Dabei wird angegeben, in wie vielen Nächten pro Jahr mit Polarlichtern zu rechnen ist [Schlegel und Schlegel, 2011].

Der Zusammenhang zwischen Polarlichtern und magnetischer Aktivität wurde erstmals von George Graham (1674 - 1751) belegt, der exakte Messungen der lokalen Feldfluktuationen vornahm. Als erster Europäer konnte James Cook (1728 - 1779) am 17. Februar 1773 die “Aurora Australis”, also die Polarlichter auf der südlichen Hemisphäre, beobachten. Von da an war klar, dass Aurorae in polaren Regionen auf beiden Hemisphären auftreten [Bone, 1996]. Im 19. Jh. entdeckte Samuel Heinrich Schwabe (1789- 1875) den etwa 11-jährigen Sonnenaktivitätszyklus beim Auswerten der Sonnenfleckenzahlen [Schwabe, 1844]. Der Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und Polarlichtern wurde klar, nachdem Richard Christopher Carrington (1826 - 1875) 1859 einen Weißlichtausbruch, also einen hellen solaren Ausbruch im visuellen Bereich des Spektrums, beobachtete, auf den starke Polar-

lichter auf der ganzen Erde folgten. Loomis [1860] stellte 1860 fest, dass Polarlichter in bestimmten Breiten häufiger auftreten. Hermann Fritz (1830 - 1893), auch bekannt für seinen Polarlichtkatalog [Fritz, 1873], bezeichnete Orte mit gleicher Polarlichthäufigkeit als Isochasmen (siehe Abbildung 2.12). Ende des 19. Jh. führte Kristian Birkeland (1867 - 1917) sein Terrella-Experiment durch (siehe Abbildung 2.13). Dabei platzierte er einen

Stabmagneten in einer Eisenkugel, die mit fluoreszierender Farbe beschichtet war. Die Kugel befand sich in einer Vakuumkammer und wurde mit Elektronen beschossen. Diese bewegten sich entlang der magnetischen Feldlinien und erzeugten kreisförmige Leuchterscheinungen an beiden Polen der Kugel, ähnlich den Auroraovalen, deren Existenz später klar wurde [Akasofu, 2009]. Erst zu Beginn des 20. Jh. konnte die Höhe der Polarlichter korrekt ermittelt werden. Dies gelang Carl Stormer (1874 - 1957), der die Fortschritte in der Fotografie nutzte, um simultane Fotos des Polarlichts mittels eines Netzwerkes aus etwa 20 Kameras aufzunehmen. Anhand von ca. 40000 Bildern konnte Stormer die Höhe des Polarlichts bestimmen [Bone, 1996].

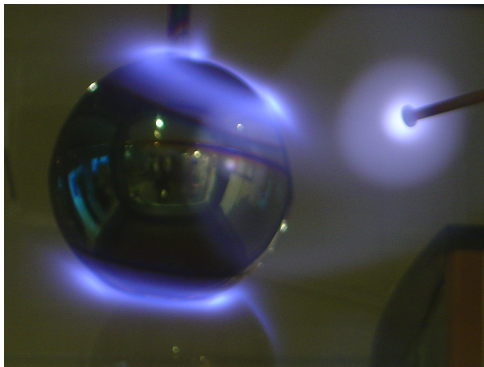


ABBILDUNG 2.13: Das von Birkeland durchgeführte Terrella-Experiment zeigt zwei ringförmige leuchtende Bereiche, ähnlich den Polarlichtovalen [David Monniaux/ CC-by-sa 3.0].

Nach erstmaligen Beobachtungen im $H\alpha$ -Licht wurde klar, dass die Oberfläche der Sonne nicht ruhig ist, woraufhin der Zusammenhang zwischen solaren Ausbrüchen (Flares) und Polarlichtern auf der Erde akzeptiert wurde. Große Fortschritte gab es im Internationalen Geophysikalischen Jahr (IGY) vom 01.07.1957 bis zum 31.12.1958 während des starken Sonnenmaximums des 19. Zyklus. In diesem Jahr wurde eine kontinuierliche Beobachtung mit All-Sky-Kameras initiiert [Siedentopf, 1959]. Die Auswertung dieser Aufnahmen machten erstmals die globalen Strukturen der Polarlichter klar [Bone, 1996]. So entdeckte Feldstein 1964, dass Polarlichter in Ovalen auf beiden Hemisphären auftreten (siehe Abbildung 2.15). Mitte der 60er Jahre

waren bereits erste Satelliten verfügbar, wobei Satellitenbeobachtungen auch heute noch eine große Rolle in der Erforschung der Polarlichter spielen [Bone, 1996].

2.4.2 Entstehung der Polarlichter

Heute ist bekannt, dass Polarlichter durch solare Teilchen erzeugt werden, die in die Magnetosphäre und später in die Ionosphäre der Erde eindringen (siehe Kapitel 2.3.2). Dort regen sie hauptsächlich atomaren Sauerstoff sowie molekularen Stickstoff an, was bei der Relaxation zum Aussenden von Photonen führt, die als Leuchterscheinungen wahrgenommen werden. Grundsätzlich können Polarlichter also als Manifestation der Wechselwirkung zwischen magnetosphärischem Plasma mit der Erdatmosphäre aufgefasst werden und bilden damit einen wichtigen Grundstein in der Erforschung dieser Prozesse. Das grüne Leuchten der Polarlichter ist auf die von Angström 1866 entdeckte Emissionsli-

nie bei 557,7 nm zurückzuführen, deren Ursprung erst 1925 identifiziert werden konnte [Paschmann *et al.*, 2002]. Dabei tritt die grüne Emission insbesondere in Höhen zwischen 100 km und 200 km auf [Paschmann *et al.*, 2002]. Hierbei spielt atomarer Sauerstoff eine wichtige Rolle, dessen Energieniveauschema mit den wichtigsten Übergängen in Abbildung 2.14 zu sehen ist.

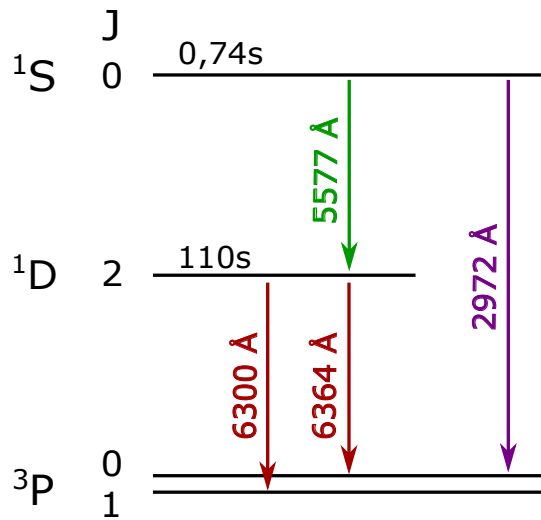


ABBILDUNG 2.14: Darstellung der Energieniveaus und Übergänge des atomaren Sauerstoffs, die im Falle der Polarlichter eine Rolle spielen. Nach Roach und Smith [1967].

Dort ist neben den Wellenlängen der Übergänge auch die Lebensdauer der angeregten Zustände gezeigt. Es wird deutlich, dass der rote Übergang eine sehr lange Lebensdauer von 110 s besitzt, weshalb in unteren und somit dichteren Atmosphärenschichten (100 km bis 200 km) der Übergang aufgrund von Stößen unterdrückt ist. Dies hat zur Folge, dass Auroravorhänge erst in einer Höhe von mehr als 200 km rot erscheinen [Paschmann *et al.*, 2002]. Im Bereich von 100 km kann mitunter ein schmaler Streifen eines violetten Leuchtens beobachtet werden, welches seinen Ursprung in molekularem Stickstoff hat [Akasofu, 2009].

Polarlichter treten in einer Reihe von Formen und Farben auf. Ebenso variiert die Dynamik auf verschiedenen Zeitskalen. Zudem können großräumige und kleinräumige Strukturen unterschieden werden.

Großräumige Strukturen. Hierzu zählen die Polarlichtovale beider Hemisphären, die von Feldstein [1964] entdeckt wurden. Die Ovale weisen, aufgrund der Deformation der Magnetosphäre, eine Verschiebung zum Mitternachtssektor auf, die in Kapitel 3.2.2 genauer diskutiert wird. Zudem wird in Abschnitt 3.2.2 klar, dass sich die Auroraovale linear mit steigendem Kp-Index vergrößern. Somit können mit steigender Aktivität Polarlichter näher am Äquator beobachtet werden [Kamide *et al.*, 2007]. Zur Darstellung der Ovale für verschiedene Level der magnetischen Aktivität können zum Beispiel die zwei in Abschnitt 4.1.1 diskutierten Modelle genutzt werden. Die Auroraovale sind im Sonne-Erde-System räumlich stationär, wobei sich die Erde unter den Ovalen hinwegdreht. Nicht zu verwechseln sind die Polarlichtovale mit der von Fritz [1873] gefundenen Polarlichtzone, die den Bereich der höchsten Polarlichthäufigkeit beschreibt. Letztere basiert auf Fritz' Polarlicht-

katalog und nutzt zur Bestimmung lediglich Aurorabeobachtungen im Zenit. Die Ränder dieser Polarlichtzone sind durch eine Aurorawahrscheinlichkeit von 50 % gekennzeichnet [Kamide *et al.*, 2007]. Feldstein [1964] hingegen konnte mittels All-Sky-Aufnahmen das globale Oval bestimmen, welches sich auch über die Tagseite erstreckt. In der Nähe des Mitternachtssektors stimmen Auroraoval und Polarlichtzone überein (Abbildung 2.15).

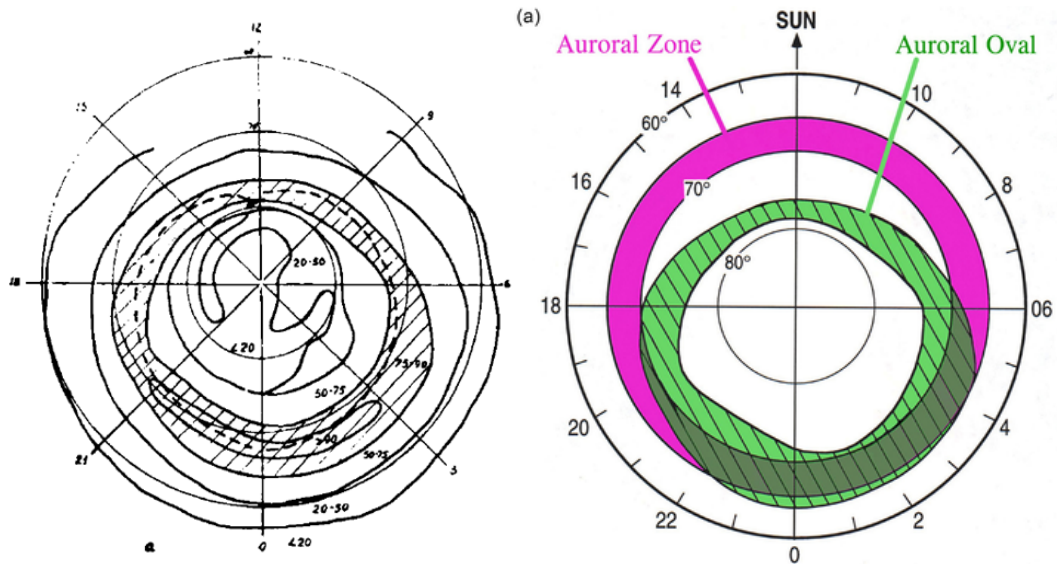


ABBILDUNG 2.15: Links: Auroraoval der Nordhalbkugel nach Feldstein [1964]. Rechts: In rot ist die von Fritz [1873] entdeckte Polarlichtzone dargestellt, also der Bereich höchster Polarlichthäufigkeit. In grün hingegen sind die von Feldstein [1964] entdeckten Auroraovals zu sehen, die sich auf der Nachtseite mit der Polarlichtzone decken. Aus Akasofu [2009].

Allgemein wird angenommen, dass die magnetischen Feldlinien in der polaren Kappe, also innerhalb der polnahen Grenze der Ovale, “offen” sind. Das bedeutet, dass sie mit dem IMF verknüpft sind (siehe Abbildung 2.8). Die Feldlinien unterhalb der polnahen Grenze hingegen sind “geschlossen” [Chisham *et al.*, 2004]. Dennoch können auch in der polaren Kappe Polarlichter auftreten, die dann in Mittag-Mitternacht-Richtung orientiert sind. Diese werden als Θ -Aurorae bezeichnet, da sie vom Weltall aus betrachtet zusammen mit dem Oval ein Θ nachbilden [Bone, 1996]. Diese Form der Polarlichter ist sehr schwach und tritt nur bei geringer magnetischer Aktivität auf, die mit einer Nordwärtsorientierung des IMF einhergeht [Kamide *et al.*, 2007]. Lange Zeit war unklar, ob diese Polarlichter durch offene Feldlinien und somit direkt durch den Sonnenwind entstehen. Fear *et al.* [2014] fanden heraus, dass die Feldlinien, die zur Θ -Aurora führen, heißes Plasma enthalten, was typisch für geschlossene Feldlinien in der Plasmaschicht ist. Es muss also magnetische Rekonnexion im Magnetfeldschweif an Punkten innerhalb der Schweifkeulen erfolgen, an denen dies im Falle eines Südwärts-IMF typischerweise nicht der Fall ist [Fear *et al.*, 2014].

Kleinräumige Strukturen. Diese können beim Betrachten der Polarlichter vom Boden aus deutlich werden. Je nach magnetischer Aktivität können verschiedene Erscheinungsformen beobachtet werden. Typisch für geringe Aktivität sind ruhige Polarlichtvorhänge, die einige 100 m bis wenige km breit sind und mehrere 1000 km in der geografischen Länge überspannen können [Paschmann *et al.*, 2002]. Ruhige Polarlichtvorhänge werden durch Elektronen mit einer Energie von einigen keV bis wenigen 10 keV erzeugt. Diese sind verbunden mit aufwärtsgerichteten feldparallelen Strömen, die bis in die Magnetosphäre reichen, wobei diese Ströme nicht unbedingt mit einem einzelnen Polarlichtvorhang übereinstimmen müssen. Mehrere Vorhänge können in einem Bereich der feldparallelen Ströme vorkommen [Borovsky *et al.*, 2019]. Weshalb dies der Fall ist und wieso Polarlichter überhaupt eine vorhangartige Struktur bilden ist laut Akasofu [2009] noch nicht verstanden. Allerdings sind die Vorhänge mit dünnen Bereichen eindringender Elektronen assoziiert [Paschmann *et al.*, 2002]. Steigt die Aktivität an, bilden sich gestreifte oder aktive Vorhänge aus, die ihre Struktur Falten und Spiralen zu verdanken haben [Akasofu, 2009].

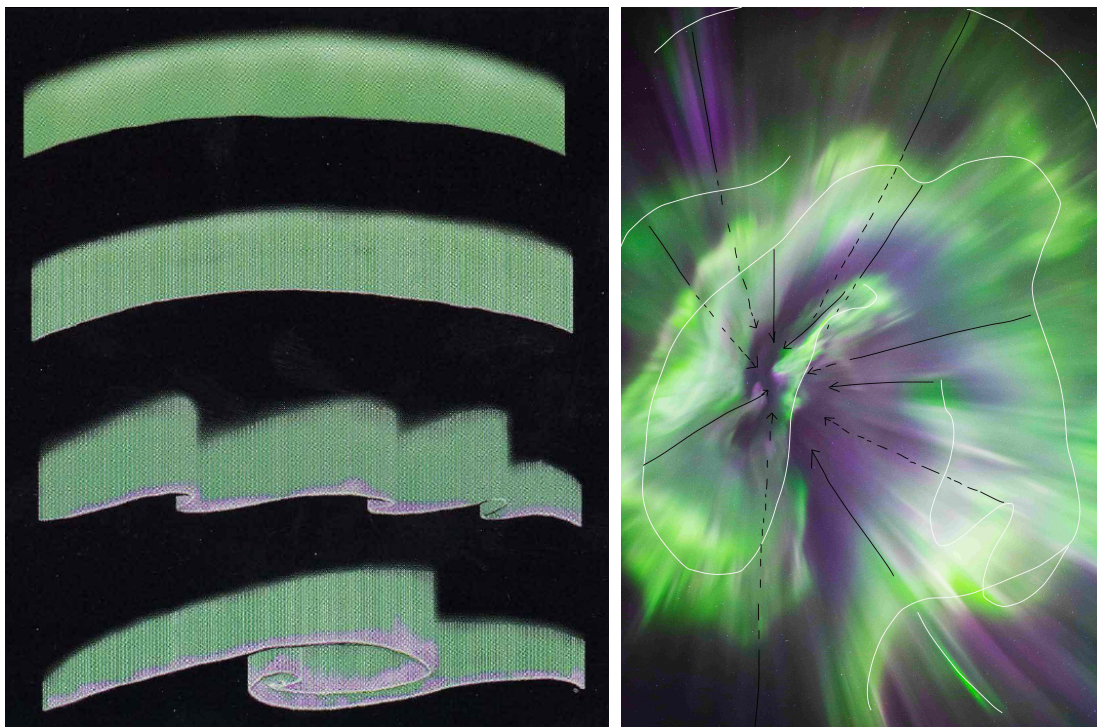


ABBILDUNG 2.16: Links: Erscheinungsformen der Polarlichtvorhänge abhängig von ihrer Aktivität. Oben ist ein ruhiger Auroravorhang dargestellt. Nach unten nimmt die Aktivität zu und die Vorhänge weisen immer komplexere Strukturen auf (aus Akasofu [2009]). Rechts: Befindet sich ein Beobachter direkt unterhalb eines Polarlichtvorhangs, so kommt es zu einer Erscheinungsform, die als Korona bezeichnet wird [Anders, 2019].

Danielides und Kozlovsky [2001] beschreiben, wie solche Strukturen durch einen Wechsel von aufwärts- und abwärtsgerichteten feldparallelen Strömen entstehen können. Letztere sind zudem mit einem Elektronenfluss in die Magnetosphäre verbunden. Aufgrund der geringeren Energie erzeugen diese Elektronen keine Leuchterscheinung, sondern dunkle Streifen innerhalb oder zwischen verschiedenen Vorhängen. Hier wird von der sogenannten “schwarzen Aurora” gesprochen [*Paschmann et al.*, 2002]. Ein Vergleich zwischen ruhigen und aktiven Vorhängen ist in Abbildung 2.16 zu sehen. Dabei sind zudem verschiedene Level der Aktivität dargestellt. Je nach Standort variieren die Erscheinungsformen der Polarlichter erneut. Vorhänge sind in einigem Abstand zum Polarlicht wahrnehmbar. Befindet sich die Aurora im Zenit, so entsteht eine sogenannte Korona (siehe Abbildung 2.16).

2.4.3 Geomagnetische Stürme und Teilstürme

Geomagnetische Stürme können, wie in Abschnitt 2.3.2 dargelegt, durch eine Abnahme des Dst-Index beschrieben werden. Dabei werden Phasen mit einem Dst-Index von weniger als -50 nT als Geomagnetsturm bezeichnet [*Kamide et al.*, 2007]. Insbesondere spielt hier die Ausrichtung des IMF eine große Rolle. Typischerweise treten pro Jahr, abhängig von der Sonnenaktivität, 20 bis 50 Geomagnetstürme auf [*Kamide et al.*, 2007]. Der Auslöser geomagnetischer Stürme sind Veränderungen im Sonnenwind, die mit koronalen Massenauswürfen (CMEs) und koronalen Löchern einhergehen. CMEs sind Sonnenausbrüche, bei denen große Mengen an Material ausgestoßen werden. Dies geschieht besonders häufig nahe des Sonnenmaximums. Während der Abnahme der Sonnenaktivität treten sogenannte koronale Löcher auf, die einen Sonnenwind mit einer sehr hohen Geschwindigkeit³ (750 km/s bis 800 km/s) emittieren [*Kamide et al.*, 2007]. Wenn dieser Hochgeschwindigkeitswind oder ein CME die Erde trifft, kann unter der Bedingung einer hohen Geoeffektivität ein Geomagnetsturm entstehen. Geoeffektivität hängt davon ab, ob eine effiziente Kopplung zwischen Sonnenwind und Erdmagnetfeld stattfinden kann. *Wang et al.* [2014] führten eine Reihe von Simulationen durch, um eine Kopplungsfunktion zwischen Sonnenwind und Erdmagnetfeld zu ermitteln. Diese Funktion gibt an, wie viel Energie E_{in} ($[E_{\text{in}}] = \text{W}$), abhängig von verschiedenen Parametern, in die Magnetosphäre eingebracht werden kann. Die Formel lautet

$$E_{\text{in}} = 3,78 \cdot 10^7 n^{0,24} v^{1,47} B_{\text{T}}^{0,86} (\sin^{2,7}(\theta/2) + 0,25). \quad (2.8)$$

³Der langsame Sonnenwind weist im Vergleich dazu Geschwindigkeiten zwischen 250 km/s und 400 km/s auf [*Kamide et al.*, 2007].

Dabei ist n die Partikeldichte in cm^{-3} , v die Geschwindigkeit des Sonnenwindes in km/s und B_T das transversale Magnetfeld in nT , welches sich aus der x- und y-Komponente des IMF über $B_T = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$ berechnet. Der Winkel θ ist der Winkel des IMF gegenüber der Dipolachse der Erde. Ein Winkel von $\theta = 180^\circ$ maximiert dabei E_{in} und gibt ein starkes südwärtsgerichtetes IMF an.

Akasofu und Chapman [1961] bemerkten, dass Geomagnetstürme auch mit starken Aurora-Elektrojets einhergehen, gepaart mit starker Polarlichtaktivität. Die magnetischen Störungen durch diese extrem starken Stürme können Auswirkungen zum Beispiel auf Stromnetze oder Kommunikation haben. Je nach ihrer Stärke werden Geomagnetstürme in fünf Kategorien eingeteilt, die die Stärke und auch die Auswirkungen beschreiben. Informationen über diese Einteilung sind in Anhang A in Abbildung A.3 gegeben.

Neben den geomagnetischen Stürmen, von denen einige moderne wie auch historische in dieser Arbeit untersucht werden, gibt es auch Teilstürme. Diese gehen ebenfalls mit einer Veränderung der Ausrichtung des IMF einher. Sie sind allerdings nicht notwendigerweise mit solaren Ausbrüchen verbunden [*Lakhina et al.*, 2006]. Grundsätzlich haben beide Prozesse (Stürme und Teilstürme) gemein, dass eine Veränderung in der Kopplung bzw. eine Änderung der in die Magnetosphäre eingebrachten Energie das jeweilige Event bedingt. Teilstürme dauern, anders als Geomagnetstürme, nur wenige Stunden und treten deutlich häufiger auf. Zudem beschränken sich ihre Effekte auf polare Regionen [*Kamide et al.*, 2007]. Im Falle der Teilstürme wird zwischen einer Aufbau-, Ausdehnungs- und Erholungsphase unterschieden. Erstere ist durch einen erhöhten Energieeintrag in die Magnetosphäre gekennzeichnet, die in Form von magnetischer Energie im Magnetfeldschweif gespeichert wird [*Lakhina et al.*, 2006]. Bei der Ausdehnungsphase wird die gespeicherte Energie durch erhöhte Rekonnexion im Magnetfeldschweif freigesetzt und Elektronen sowie Ionen in die Atmosphäre hineinbeschleunigt. Dabei kommt es zu einer Aktivitätszunahme der zuvor ruhigen Polarlichtvorhänge im Mitternachtssektor und zu einer Verbreiterung des Polarlichtovals. Es bilden sich charakteristische Strukturen wie die “westwärts-laufende Welle” im Abendsektor und die “Omegabänder” im Morgensektor. In dieser Phase bildet sich der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellte Teilsturm-Elektrojet aus. Während der Erholungsphase nimmt die Magnetosphäre wieder ihre ursprüngliche Form an [*Akasofu*, 2009].

Die Teilstürme werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, da typischerweise Beobachtungen von einer Nacht bis einigen Nächten kombiniert werden und somit Teilstürme nicht aufgelöst werden können. Dies wäre mit einzelnen Beobachtungen, insbesondere in den historischen Fällen, auch nicht möglich.

Kapitel 3

Auswertung von Polarlichtbeobachtungen

In diesem Kapitel soll auf die verschiedenen Arten der Polarlichtbeobachtung eingegangen werden, wobei zwischen historischen und modernen Beobachtungen unterschieden wird. Polarlichter werden schon seit langer Zeit von der Menschheit beobachtet und ihr Auftreten auf unterschiedliche Arten an die Nachwelt weitergetragen. Dies geschah nicht nur auf schriftlichem Weg, sondern auch in Form von Zeichnungen und künstlerischen Darstellungen. Diese historischen Sichtungen werden genutzt, um einen Polarlichtkatalog zu erstellen. Es wird gezeigt, wie aus den Berichten die Informationen extrahiert werden können, die für die Rekonstruktion des Polarlichtovals erforderlich sind. Seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr werden Polarlichter einheitlich mit All-Sky-Kameras beobachtet und auch erste Satelliten eröffneten neue Möglichkeiten, die Aurorae zu untersuchen [Bone, 1996]. Wie diese Daten ausgewertet werden können, wird ebenfalls in diesem Abschnitt dargelegt.

3.1 Historische Sichtungen - Polarlichtkataloge

Im Rahmen dieser Arbeit werden auch historische Geomagnetstürme behandelt, für die Polarlichtsichtungen benötigt werden. Es liegt eine Vielzahl an Katalogen vor, die für diesen Zweck genutzt werden können. Allen voran sei hier der Katalog von Hermann Fritz [Fritz, 1873] genannt, der Polarlichter zwischen 503 v. Chr. und 1872 n. Chr. enthält. In diesem Katalog werden neben dem Datum lediglich die Orte und Quellen der Sichtungen genannt. Werden, wie im vorliegenden Fall, weitere Informationen benötigt, so sind die Originalquellen zu konsultieren. Tabelle D.1 in Anhang D zeigt die verschiedenen Aurorakataloge, die geprüft wurden. Insgesamt handelt es sich um 35 Kataloge, die einen

Zeitraum von 626 v. Chr. bis 1976 n. Chr. abdecken. Diese Kataloge enthalten 114719 Polarlichtsichtungen, wobei hier Dopplungen vorliegen können. Für 14 dieser Kataloge konnten die Quellen untersucht werden, was einer Gesamtzahl von 2496 gelesenen Berichten entspricht. Aus diesen Quellen wurden die Informationen ermittelt, die für die in Kapitel 4 beschriebene Methode notwendig sind. Neben diesen Berichten wurden weiterhin die Originalquellen der historischen Stürme ausgewertet, wobei auch Zeitungsartikel untersucht wurden.

In historischen Berichten ist es wichtig zu prüfen, ob von Polarlichtern oder anderen Phänomenen die Rede ist. So können Polarlichter mit Halos, Meteoren oder Wetterphänomenen verwechselt werden. Um solche Verwechslungen auszuschließen, haben *Neuhäuser und Neuhäuser* [2015a] fünf Kriterien entwickelt, mit deren Hilfe geprüft werden kann, ob ein Bericht tatsächlich ein Polarlicht beschreibt. Diese Kriterien sollen im Folgenden beschrieben werden.

1. Farbe: In den Berichten sollten typische Farben auftreten, so zum Beispiel *rot*, *grün* und *blau*. Diese Farben werden mitunter nicht direkt genannt, sondern die Erscheinung wird mit *Feuer* oder *Blut* verglichen, was wiederum auf eine rote Farbe schließen lässt. Worte wie *weiß* oder *Glanz* sind dagegen als neutral zu betrachten, sprechen also weder für noch gegen ein Polarlicht.
2. Bewegung: Polarlichter sind dynamische Erscheinungen. Daher sind auch Begriffe wie *Feuer*, *Kampf*, *Armee* und *Drachen* als Hinweis auf Polarlichter zu sehen.
3. Himmelsrichtung: Insbesondere in mittleren und tieferen Breiten treten Polarlichter im *Norden* auf, was als starkes Indiz für Aurorae zu sehen ist. Himmelsrichtungen wie *Ost* oder *West* sind als neutral zu betrachten, wohingegen Beobachtungen ausschließlich im *Süden* ausgeschlossen werden.
4. Uhrzeit der Beobachtung: Polarlichter sind tagsüber aufgrund der zu hohen Himmelselligkeit nicht beobachtbar. Daher ist auf Begriffe wie *nachts* zu achten. Auch *nach Sonnenuntergang* und *vor Sonnenaufgang* schließt Polarlichter nicht aus, weshalb diese Angaben als neutral zu betrachten sind. Werden in Berichten dagegen Phänomene beschrieben, die bei Tageslicht auftreten oder bei Sonnenunter- oder aufgang, so sind hier vermutlich keine Polarlichter gemeint.
5. Mehrfaches Auftreten in aufeinanderfolgenden Nächten: Auch das Auftreten der Erscheinung in aufeinanderfolgenden Nächten, wenn auch in unterschiedlicher Intensität, weist auf Aurorae hin.

Abhängig von der Anzahl der fünf erfüllten Kriterien wird ein Polarlicht als *fast sicher* ($N = 5$), *sehr wahrscheinlich* ($N = 4$), *wahrscheinlich* ($N = 3$), *möglich* ($N = 2$), *unwahrscheinlich* ($N = 1$) oder *sehr unwahrscheinlich* ($N = 0$) eingestuft. *Stephenson et al.* [2019] argumentieren, dass insbesondere das dritte Kriterium genauer zu betrachten ist. So wird die Aurora Australis typischerweise im Süden gesehen, weshalb Kriterium 3 wie hier gezeigt, nur auf die Aurora Borealis anzuwenden ist. Zudem verweisen *Stephenson et al.* [2019] darauf, dass für extreme Events Polarlichter auch auf der Nordhalbkugel im Süden auftreten können. Dies passiert vor allem dann, wenn sich ein Beobachter nördlich der polnahen Grenze des Ovals befindet. Berichte des Carrington-Events zeigen, dass auch hier Sichtungen im Süden gemacht wurden. Dieses Kriterium könnte also so verallgemeinert werden, dass auch südliche Beobachtungen ein Polarlicht nicht ausschließen. Nichtsdestotrotz bilden die Kriterien von *Neuhäuser und Neuhäuser* [2015a] einen sehr guten Ansatz, um Polarlichter von anderen Erscheinungen zu unterscheiden.

Nachdem Verwechslungen ausgeschlossen oder zumindest als unwahrscheinlich deklariert wurden, konnten den Berichten weitere Informationen entnommen werden. Im Folgenden ist ein Bericht vom 28.08.1859 aus Louisville (KY, USA) zu sehen, der aus dem Englischen übersetzt wurde (Bericht 30 in Tabelle D.11 in Anhang D, eigene Übersetzung):

Eines der großartigsten Polarlichter, welches jemals in diesen Breiten gesehen wurde, ereignete sich gegen 21:00 Uhr am 28. August. Der gesamte Himmel, vom nördlichen Horizont bis zum Zenit, war brillant beleuchtet mit einem rosa Licht und einem lebhaften Blitzen. Der Nordwesthimmel war der Teil, der am beeindruckendsten erhellt war, aber im Nordosten war das rosa Licht ebenfalls wunderschön.

Aus diesem Bericht können verschiedene Informationen entnommen werden. So ist bekannt, dass das Polarlicht am 28. August gegen 21:00 Uhr Lokalzeit (LT) auftrat. Zu diesem Zeitpunkt steht die Sonne in Louisville (KY, USA) etwa 26° unterhalb des Horizonts. In diesem Fall ist nur eine Anfangsuhrzeit gegeben. In Fällen, bei denen auch eine Enduhrzeit genannt wird, wird der Mittelwert verwendet. Der Bericht beschreibt außerdem, dass der gesamte nördliche Himmel bis zum Zenit erhellt war. Es kann also angenommen werden, dass das Polarlicht von Westen über Norden bis hin zum Osten beobachtet wurde. Als Azimut ergibt sich damit ein Winkel zwischen 270° und 90° . Die Höhe erstreckt sich zwischen dem Horizont und dem Zenit. Für den Horizont wird eine minimale Höhe von 5° angenommen, da durch Vegetation oder die umliegende Landschaft selten der mathematische Horizont bei 0° beobachtet werden kann. Der Zenit hat eine Höhe von 90° . Sowohl für den Azimut als auch die Höhe wird jeweils der Mittelwert angenommen. Es ergibt sich also ein Polarlicht in Louisville (KY, USA), welches um 21:00

Uhr LT am 28.08.1859 in Azimutrichtung 0° bei einer Höhe von $47,5^\circ$ beobachtet wurde und eine rosa Farbe aufwies. Die geografische Position der Orte wurde mit *Google Maps* ermittelt, wobei zumeist drei Nachkommastellen angegeben werden. Sind nur Länder oder Gebiete benannt, wird die Mitte dieses Bereichs abgeschätzt und die Koordinaten lediglich auf eine Nachkommastelle angegeben, da keine genaueren Aussagen getroffen werden können.

Ähnlich wie in diesem Beispiel wurde bei allen Berichten verfahren. Jedoch sind Angaben wie Zeit oder Richtung nicht in allen Fällen eindeutig. Bei ostasiatischen Sichtungen wird oft ein Zeitintervall, die sogenannten “watches”, angegeben. Dabei wird das Intervall zwischen Abend- und Morgendämmerung in fünf gleich lange “watches” eingeteilt, weshalb das Zeitintervall je nach Tag in seiner Dauer variiert [Yau et al., 1995]. Diese Informationen können ebenfalls genutzt werden, um den Beobachtungszeitpunkt der Polarlichter einzugrenzen. Teilweise werden Uhrzeiten nur mit Begriffen wie “früh” oder “Dämmerung” beschrieben. In solchen Fällen müssen gerechtfertigte Annahmen getroffen werden, was mit dem jeweiligen Wort gemeint sein könnte. Im Falle der Uhrzeiten ist es sinnvoll, sich am Sonnenstand zu orientieren, also Angaben über die Höhe der Sonne zu machen. Dabei wurde sich insbesondere an der bürgerlichen, nautischen und astronomischen Dämmerung orientiert¹. Mittels *Stellarium 0.16.1* [Zotti et al., 2017] kann dann die entsprechende Zeit ermittelt werden. In allen Berichten, auch in den moderneren Fällen, wird der Beobachtungszeitpunkt in LT angegeben. Begriffen feste Uhrzeiten zuzuordnen statt sich am Sonnenstand zu orientieren, würde das Problem mit sich bringen, dass Angaben je nach Jahreszeit und nach Beobachtungsstandort variieren können. Tabelle 3.1 zeigt die getroffenen Annahmen, sowohl für die Zeitangaben, als auch für Angaben über die Polarlichthöhe sowie -richtung. Entgegen der Angaben aus *Neuhäuser und Neuhäuser* [2015a] werden hier auch die Begriffe “Sonnenaufgang” und “Sonnenuntergang” genutzt, die in den geprüften Berichten auftreten. Es sei erwähnt, dass die in dieser Arbeit untersuchten Geomagnetstürme in relativ modernen Zeiten beobachtet wurden, sodass davon auszugehen ist, dass die Menschen in vielen Fällen wussten, was sie beobachten. Wenn in diesen Berichten also von “Sonnenaufgang” und “Sonnenuntergang” die Rede ist, wird vermutlich der Zeitpunkt beschrieben, zu dem eine Sichtung des Polarlichts aufgrund der zu großen Himmelselligkeit nicht mehr möglich ist. Um dem Sorge zu tragen, wurde für diese Angaben die bürgerliche Dämmerung verwendet.

Mit diesen Definitionen ist es möglich, den genannten Informationen konkrete Zahlen zuzuordnen. Die getroffenen Annahmen sind allerdings fehlerbehaftet. Eine genauere Kenntnis dessen, was die verschiedenen Begriffe innerhalb der Berichte bedeuten, wäre also von

¹Bei der bürgerlichen Dämmerung steht die Sonne 6° unter dem Horizont. Bei der nautischen Dämmerung beträgt die Sonnenhöhe -12° und bei der astronomischen Dämmerung -18° .

TABELLE 3.1: Zuordnung konkreter Zahlenwerte zu verschiedenen in den Berichten verwendeten Begrifflichkeiten.

Zeiten	Sonnenhöhe [°]	Höhe	Annahme [°]	Richtung	Annahme
Sonnenauf- & untergang	−6	hoch	60	N, O, S, W von ...	45° Bereich
Nacht, während der Nacht	−18 bis −18	sehr hoch	80	gesamte N	W bis O
Tageslicht, Tagesanbruch	−6	einige Grad	5	einige Grad neben	5°
Dämmerung	−12	sehr tief	5	... neben ...	45° Bereich
früher Morgen	−12	tief	5 – 10	etwas neben ...	20° Bereich
Morgen	−9	Horizont	5 – 10	Hälfte des Himmels	180° Bereich
früher Abend	−6	nahe Horizont	5 – 10		
Abend	−9	nahe Zenit	85		
später Abend	−12	Zenit	90		
gesamter Abend	−6 bis Mitternacht	bis Zenit	5 – 90		
Großteil des Abends	−6 bis −12				

Vorteil. Die Ungenauigkeiten werden in der in Kapitel 4.1 beschriebenen Methode mit einbezogen.

Durch Mittelwertbildung in Azimutrichtung und Höhe wird lediglich ein Punkt für das beobachtete Polarlicht berechnet, der nicht die Ausdehnung des gesamten Polarlichtvorhangs widerspiegelt. Für die spätere Rekonstruktion des Ovals ist allerdings die Kenntnis einer ganz bestimmten Auroraposition ausreichend, da dieser eine Punkt definitiv einen Teil des Ovals darstellt.

3.2 Moderne Polarlichtbeobachtungen

Der technische Fortschritt im 20. Jh. wurde genutzt, um Polarlichter intensiver zu studieren. Vor dem IGY wurde ein Netzwerk von All-Sky-Kameras installiert, um eine regelmäßige und einheitliche Beobachtung von Aurorae zu ermöglichen. Die so entstandenen Aufnahmen trugen zum Verständnis der globalen Strukturen der Polarlichter bei. Zur gleichen Zeit gab es erste Raketen, mit deren Hilfe Instrumente in den Bereich der Polarlichtovals gebracht werden konnten, um in situ Messungen der Partikeldichten und -energien vorzunehmen [Bone, 1996]. Mitte der 60er-Jahre konnten erste Satelliten die Magnetosphäre und den Sonnenwind vermessen [Bone, 1996]. Seitdem wurde eine Vielzahl von Techniken entwickelt, um die Polarlichter zu untersuchen.

3.2.1 Übersicht zu modernen Beobachtungstechniken

Satellitendaten. Im Wesentlichen gibt es zwei Arten von Satelliten mit denen das Auroraoval untersucht werden kann. Der erste Typus misst dabei elektrische Ströme, die im Polarlichtoval fließen. Dabei können auch Magnetfeldmessungen von CHAMP (CHAL-

lenging Minisatellite Payload) genutzt werden, um kleinräumige feldparallele Ströme (< 150 km) zu untersuchen [Xiong *et al.*, 2014]. Der zweite Typ erstellt direkte Aufnahmen der Polarlichtovale zumeist im ultravioletten Wellenlängenbereich [Carbary, 2005]. Vertreter dieser Art sind IMAGE (Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration), der Polar Satellit sowie der Dynamics Explorer 1 (DE1), der im Rahmen dieser Arbeit eine größere Rolle spielt und daher genauer betrachtet werden soll.

Der Dynamics Explorer 1 wurde am 3. August 1981 in eine exzentrische Umlaufbahn mit einer Exzentrizität von 0,62 gebracht. Sein polarer Orbit mit einer Periapsis von 567,6 km und einer Apoapsis von 23298 km ermöglicht es, globale Aufnahmen der Aurora Borealis und Aurora Australis zu erstellen. Das Hauptinstrument für diese Aufgabe ist der Spin-Scan Auroral Imager (SAI), welcher das Polarlicht im ultravioletten wie auch visuellen Bereich erfasst. Die Bilder weisen eine Größe von 121×150 Pixeln auf, was bei einer Satellitenhöhe von einem Erdradius R_E zu einer räumlichen Auflösung von 28 km je Pixel in Nadirrichtung führt. Durch den exzentrischen Orbit variiert dieser Wert bis zu 109 km pro Pixel bei einer Höhe von $3,9 R_E$ [Wagner und Neuhäuser, 2019]. Für gewöhnlich wird alle 12 Minuten eine Aufnahme erzeugt, was es ermöglicht, mehrere Aufnahmen in einem 3h-Kp-Intervall zu mitteln. Die Orbitperiode beträgt 409 min, wobei in dieser Zeit entweder die Aurora Borealis oder die Aurora Australis beobachtet werden. Es ist außerdem möglich, dass auf den Aufnahmen weder das nördliche noch das südliche Auroraoval zu sehen sind.

Da für das in Abschnitt 3.2.2 genauer betrachtete CH-Aurora-2014-Modell [Xiong und Lühr, 2014] CHAMP Daten genutzt wurden, soll auch auf diesen Satelliten genauer eingegangen werden. CHAMP wurde am 15.07.2000 in einen zirkulären Orbit mit einer Inklination von $87,3^\circ$ und einer Höhe von 456 km gebracht. Die Orbithöhe nahm im Laufe der Mission ab und betrug im Jahre 2010 nur noch 250 km. Um alle Lokalzeiten abzudecken, benötigte der Satellit 130 Tage [Xiong *et al.*, 2014]. Ein Fluxgate-Magnetometer vermaß den magnetischen Feldvektor mit einer Auflösung von 0,1 nT. Durch einen Sternen-Sensor konnte die Orientierung des Feldvektors bestimmt werden. Xiong *et al.* [2014] beschreiben eine Methode, wie aus den gewonnenen Daten die Ovalgrenzen bestimmt werden konnten, die schließlich in das CH-Aurora-2014-Modell eingingen.

Mittels Satellitendaten kann somit die globale Morphologie der Polarlichter untersucht werden, worauf in Kapitel 3.2.2 genauer eingegangen wird.

Bodengebundene Beobachtungen. Neben Satelliten können weiterhin bodengebundene Beobachtungen genutzt werden, um Aurorae zu untersuchen. Weltweit werden nach wie vor All-Sky-Kameras betrieben, um Polarlichter zu beobachten. Aber auch Kameras, die zu anderen Zwecken installiert wurden, können Informationen liefern. Ein gu-

tes Beispiel ist die All-Sky-Kamera der Universitäts-Sternwarte der Friedrich-Schiller-Universität Jena in Großschwabhausen. Diese dient zur Prüfung der Wetterbedingungen für astronomischen Beobachtungen. Allerdings können solche Kameras, wie in diesem Fall am 17.03.2015, auch zufällig Polarlichter aufzeichnen. Diese Daten können ebenfalls genutzt werden, um Informationen über die globale Verteilung der Polarlichter zu gewinnen.

Neben professionellen Daten sind auch Amateuraufnahmen eine wichtige Informationsquelle. Für solche Berichte stehen ebenfalls Datenbanken zur Verfügung. Für Beobachtungen in Deutschland und Zentraleuropa wurde das Polarlichtarchiv von Andreas Möller verwendet (<http://www.polarlicht-archiv.de/>), dessen ältester Eintrag bis ins Jahr 1560 zurückführt. Das Archiv wird stets aktualisiert und Sichtungen werden mit Berichten wie auch Fotos dokumentiert. Zudem sind Informationen über die Sonnenaktivität und geomagnetische Aktivität für den jeweiligen Sturm hinterlegt. Ein weiteres wichtiges Archiv ist *Aurorasaurus* [MacDonald et al., 2015], ein Bürgerwissenschaftsprojekt, bei dem alle enthusiastischen und zufälligen Polarlichtsichtungen gemeldet werden können. Diese Daten werden verifiziert und Online bereitgestellt. Zudem werden Twitter Posts auf gewisse Stichworte hin ausgewählt und von Nutzern des Netzwerks auf Richtigkeit überprüft. So entsteht eine umfassende Datenbank von Polarlichtbeobachtungen, die genutzt werden kann, um Vorhersagen und Modelle zu verbessern.

Im vorliegenden Fall werden Fotos und Berichte genutzt, um die Position der Polarlichter am Himmel zu extrahieren. Bei Fotografien kann anhand der abgebildeten Hintergrundsterne die Position des Polarlichts bestimmt werden. Mittels *Stellarium 0.16.1* [Zotti et al., 2017] wird der Himmel am entsprechenden Standort und der entsprechenden Uhrzeit dargestellt. Als Uhrzeit wurde die Lokalzeit (LT) genutzt, die gegebenenfalls erst aus der Universalzeit (UT) mit der bekannten geografischen Länge des Beobachters berechnet werden musste. Anschließend wurden die hellen Sterne aus den Fotoaufnahmen mit den Positionen der Sterne in *Stellarium* [Zotti et al., 2017] verglichen, wodurch anschließend eine Aussage über die Höhe und den Azimut des Polarlichts getroffen werden konnte (siehe Abbildung 3.1). Endet ein Polarlicht nicht am Bildrand, so wurde die maximal dargestellte Ausdehnung in den Fotografien verwendet. In Fällen, bei denen das Polarlicht in gewissen Bereichen auf dem Bild endet, wurde abgeschätzt, an welcher Position die Aurora nicht mehr wahrzunehmen ist. Dies ist allerdings fehlerbehaftet, da es von den verwendeten Kameraeinstellungen, aber auch vom verwendeten Bildschirm abhängt, auf dem die Aufnahme betrachtet wird. Um dies zu berücksichtigen, wurden bei der Rekonstruktion des Ovals ausreichend große Fehlerbalken angenommen ($\pm 10^\circ$ für Höhe und Azimut). Für die anschließende Berechnung wurde der Mittelwert der Höhe und des Azimuts verwendet.

3.2 Moderne Polarlichtbeobachtungen

Mit *Stellarium* konnten weiterhin gegebene Uhrzeitintervalle eingegrenzt werden. Dazu wurde der Sternenhimmel am entsprechenden Ort an die Fotografien angepasst, was eine Abschätzung für die genaue Aufnahmezeit liefert. Berichten, in denen der Fotografie keine weiteren Informationen beigelegt waren, konnte über dieses Verfahren ebenfalls eine Beobachtungsuhrzeit zugeordnet werden.

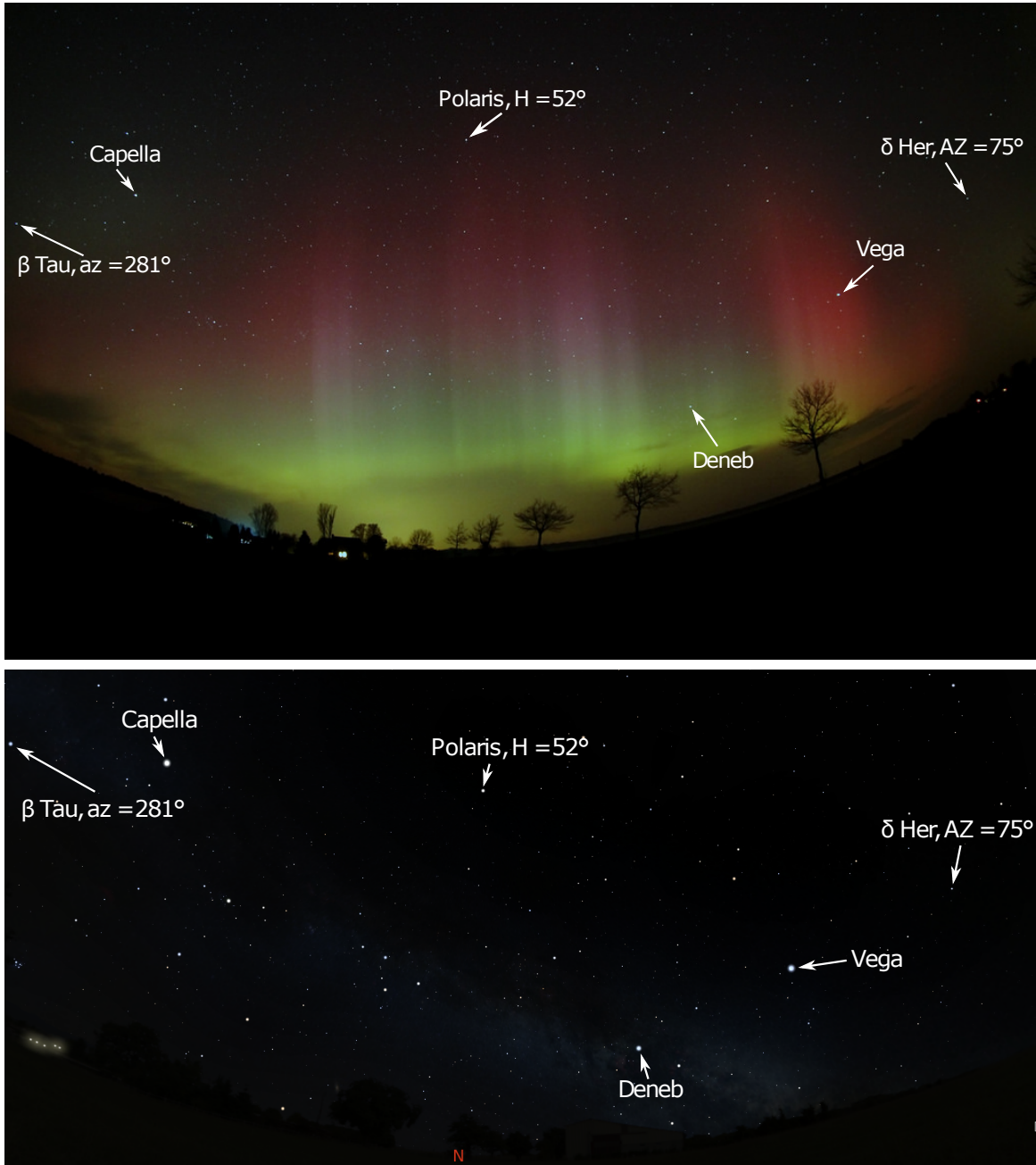


ABBILDUNG 3.1: Oben: Aufnahme des Polarlichts in Hartenholm (mit freundlicher Genehmigung von Hartwig Lüthen) am 17. März 2015 um 23:30 LT. Die Positionen heller Sterne wurden genutzt, um in *Stellarium* die Höhe und den Azimut des Polarlichts am Himmel abzuschätzen (siehe unten).

Abbildung 3.1 oben zeigt eine Aufnahme des Polarlichts in Hartenholm ($53,900^\circ$ N und $10,060^\circ$ E) am 17. März 2015 um 23:30 LT. Zu erkennen ist die typische Färbung der Polarlichter, die von einem Grün im unteren Bereich in einen Rotton im oberen Bereich übergeht. Auch eine leichte strahlenartige Struktur, wie sie für aktive Vorhänge typisch ist, ist erkennbar. Die untere Grafik in Abbildung 3.1 zeigt den gleichen Himmelsausschnitt am gleichen Standort zur selben Lokalzeit. Die hellen Sterne in der Fotografie können nun mit denen in *Stellarium* verglichen werden. Da das Polarlicht bis zum Horizont reicht, wird, wie im Falle der historischen Berichte, eine minimale Höhe von 5° angenommen. Im Westen erstreckt sich das Polarlicht bis zum Stern β Tau, mit einem Azimut von 281° . Im Osten endet die Aurora etwa in der Nähe von δ Her ($AZ = 75^\circ$). Das obere Ende des Polarlichtvorhangs kann im Bereich des Polarsterns ausgemacht werden, der eine Höhe von 52° aufweist. Sowohl der Azimut als auch die Höhe werden anschließend gemittelt, um die Position zu erhalten, die später in die Berechnung des Polarlichtovals eingeht.

3.2.2 Untersuchung der Abhängigkeit des Polarlichtovals vom Kp-Index mittels Satellitenaufnahmen

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Daten des DE1 ausgewertet wurden. Dabei basieren die Ausführungen auf der Publikation *Wagner und Neuhäuser* [2019]. Es wird untersucht, wie sich die Größe des Auroraovals mit steigendem Kp-Index verhält. Weiterhin wird geprüft, ob die Verschiebung des Ovalzentrums in Mitternachtsrichtung eine Kp-Abhängigkeit aufweist.

Auswertung der Satellitendaten

Zur Auswertung wurden zwei verschiedene Epochen der Satellitendaten genutzt, um Unterschiede zwischen Sonnenmaximum und -minimum auszuschließen. Für das Maximum wurden Daten aus den Jahren 1981/82 (244 Aufnahmen) verwendet und für das Minimum die Jahre 1986/87 (220 Aufnahmen). Diese Anzahl an Aufnahmen führt zu einer hinreichenden Genauigkeit für die Parameter und ist ein Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenzeit.

Werden Daten über größere Zeiträume (Jahrhunderte bis Jahrtausende) untersucht, müssen weitere Effekte, wie die Wanderung der Pole und das sich verändernde Dipolmoment des Erdmagnetfelds, mit einbezogen werden. Inwieweit das abnehmende Dipolmoment die Größe des Auroraovals beeinflusst, ist bisher nicht genau geklärt [*Korte und Stolze*, 2016]. *Korte und Stolze* [2016] argumentieren, dass ein erhöhtes Dipolmoment zu

stärkeren Abschirmeffekten führt, weshalb weniger solare Teilchen in unsere Atmosphäre eindringen können und folglich das Oval schrumpft. Auf der anderen Seite wird von *Siscoe et al.* [2002] vermutet, dass sich das Oval weiter gen Äquator ausbreitet. Die aus dem veränderlichen Dipolmoment resultierenden Effekte scheinen jedoch vernachlässigbar gegenüber den Effekten zu sein, die aus der Wanderung der Pole entstehen. Im Falle der Satellitendaten, bei denen lediglich wenige Jahre betrachtet werden, entfallen solche Unsicherheiten vollständig.

Für jeden der rund 18000 Pixel des Detektors stehen Matrizen zur Verfügung, die Informationen wie die Zählrate und die geographischen Koordinaten eines jeden Pixels enthalten. Damit ist es möglich, jede einzelne Aufnahme des Satelliten darzustellen. Je nach Position des Satelliten ist es möglich, dass beide Hemisphären teilweise beobachtet wurden. In diesem Fall wurden alle Pixelzählraten unterhalb von 0° geografischer Breite 0 gesetzt, wenn das Oval auf der Nordhalbkugel beobachtet wurde. Für Ovale auf der Südhalbkugel gilt dies andersherum. Die Auswertung hat gezeigt, dass keine Unterschiede in der Morphologie der Ovale auf der Nord- und Südhalbkugel aufgelöst werden können. Daher werden beide Fälle gemeinsam betrachtet.

Um die weitere Rechnung zu vereinfachen, wurde eine Koordinatentransformation von geografischen zu Quasi-Dipol-Koordinaten (QD-Koordinaten) durchgeführt. Diese basieren auf dem IGRF-12, einem Magnetfeldmodell, welches die Form und Position jeder einzelnen Feldlinie beschreibt [*Thebault et al.*, 2015]. Für die Transformation ist neben der geografischen Position auch die Höhe des Polarlichtes über dem Meeresspiegel notwendig. Die typische Höhe liegt zwischen 100 km und 500 km [*Akasofu*, 2009]. In diesem Bereich sind die Auswirkungen auf die resultierenden QD-Koordinaten vernachlässigbar, weshalb eine Höhe von 200 km festgesetzt wurde. Der Ausgangspunkt $P_0(\phi, \vartheta, h)$ in geografischen Koordinaten wird also durch die geografische Länge und Breite sowie die Höhe definiert. Bei der Transformation wird geprüft, auf welcher Feldlinie dieser Punkt liegt. Diese Linie wird anschließend bis zu ihrem Scheitelpunkt, also dem höchsten Punkt h_S über der Erde, verfolgt. Von dort aus wird eine Dipolfeldlinie bis zur Ausgangshöhe entlang gewandert, was zum Punkt P_{QD} im neuen Koordinatensystem führt (siehe Abbildung 3.2).

Um die Berechnung der QD-Koordinaten zu verdeutlichen, müssen auch Scheitelpunkt-Koordinaten eingeführt werden. In allen Fällen wird die Feldlinie des IGRF-12 zu ihrem Scheitelpunkt verfolgt. Die Entfernung zum Scheitelpunkt lässt sich als Scheitelpunktradius A darstellen, für den

$$A = 1 + \frac{h_S}{R_E} \quad (3.1)$$

gilt. Hierbei ist R_E der mittlere Erdradius.

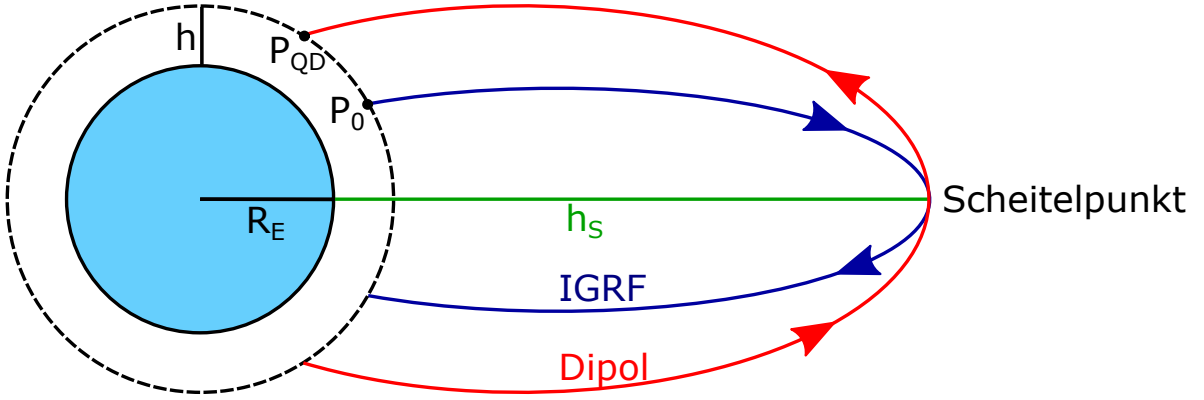


ABBILDUNG 3.2: Umrechnung von geografischen zu QD-Koordinaten. Ein Punkt P_0 , der durch seine geografischen Koordinaten sowie seine Höhe h (hier $h = 200$ km) definiert ist, liegt auf einer bestimmten Feldlinie nach dem IGRF (rot). Diese Feldlinie wird bis zu ihrem Scheitelpunkt verfolgt, von wo aus eine Dipolfeldlinie (blau) zurück zur gleichen Höhe h entlang gewandert wird. Dies ergibt den Punkt P_{QD} im neuen KOS. Die Größe R_E beschreibt dabei den Erdradius.

Für die Breite ϑ_S sowie die Länge ϕ_S gilt dabei:

$$\vartheta_S = \pm \arccos \left(A^{-\frac{1}{2}} \right); \quad (3.2)$$

$$\phi_S = \arcsin \left(\frac{\cos \vartheta \sin(\phi - \phi_0)}{\cos[\arcsin(\sin \vartheta \sin \vartheta_0 + \cos \vartheta \cos \vartheta_0 \cos(\phi - \phi_0))]} \right). \quad (3.3)$$

In diesen Gleichungen beschreiben ϑ und ϕ die geografische Breite bzw. Länge des Scheitelpunktes und ϑ_0 sowie ϕ_0 sind die geografische Breite und Länge des geomagnetischen Pols.

Für die Länge in QD-Koordinaten gilt $\phi_S = \phi_{QD}$. Die Breite ϑ_{QD} muss um die Höhe h ergänzt werden, die der Polarlichthöhe entspricht:

$$\vartheta_{QD} = \pm \arccos \left(\frac{R_E + h}{R_E + h_S} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.4)$$

Für die Koordinatentransformation wurde die Apex Python Bibliothek *apexpy 1.0.1* von Laundal und van der Meeren benutzt, die auf einem Fortran code von *Emmert et al.* [2010] basiert.

In QD-Koordinaten ist es möglich, das Auroraoval als Kreis zu approximieren, wodurch die Berechnung des Zentrums vereinfacht wird. Wie in *Milan et al.* [2009] und *Stubbs et al.* [2005] beschrieben, kann das Helligkeitsmaximum des Ovals in höhenangepassten korrigierten Geomagnetkoordinaten (AACGM) als Kreis angenommen werden. Nach *Laundal et al.* [2017] sind die Unterschiede zwischen AACGM- und QD-Koordinaten vernachläss-

sigbar, insbesondere in hohen Breiten, wo Polarlichter typischerweise auftreten.

Um diese Annahme zu prüfen, können die Ergebnisse von *Xiong und Lühr* [2014] herangezogen werden. Hierbei wurden CHAMP Beobachtungen des Magnetfeldes im Zeitraum von August 2000 bis August 2010 genutzt, um das CH-Aurora-2014-Modell zu entwickeln. Die Grenzen des Auroraovals werden mittels Ellipsen approximiert, wobei die fünf Ellipsenparameter mit dem verschmelzenden elektrischen Feld E_m in Verbindung gebracht werden. Im Folgenden wird ein Mittelwert der großen Halbachse für beide Polarlichtgrenzen sowie beide Hemisphären errechnet. Analog wird für die kleine Halbachse verfahren. Anschließend wird die Differenz aus kleiner und großer Halbachse verglichen, um die Annahme eines kreisförmigen Polarlichtovals zu überprüfen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.3 zu sehen.

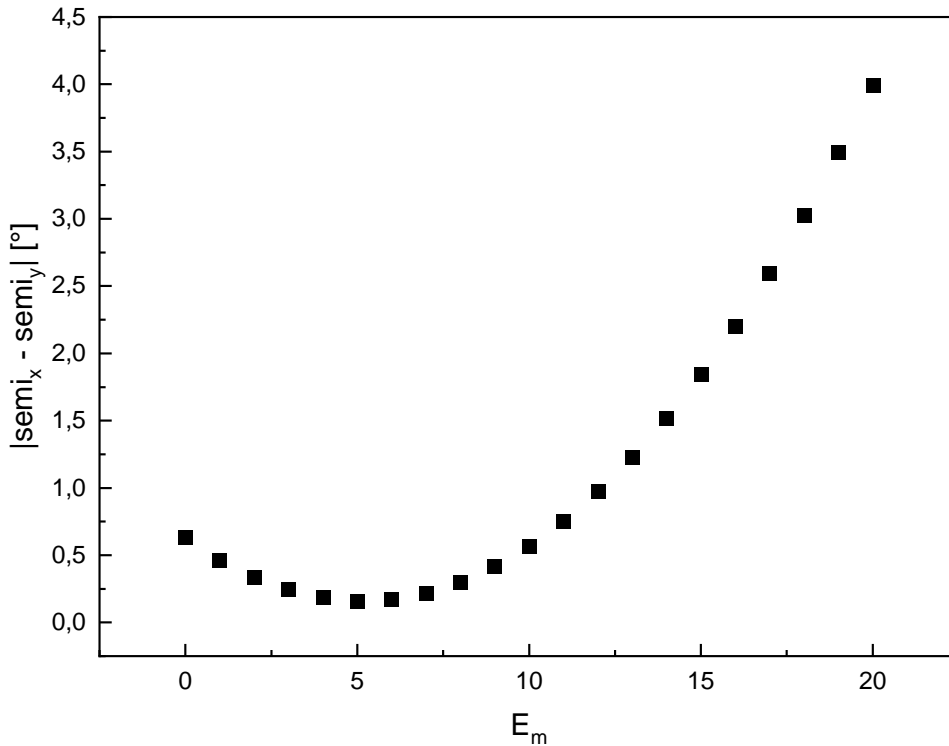


ABBILDUNG 3.3: Vergleich zwischen mittlerer großer und kleiner Halbachse für verschiedene Aktivitätslevel. Für $E_m \leq 12$ sind die Unterschiede der Halbachsen kleiner als 1° , weshalb das Auroraoval als kreisförmig angenommen werden kann.

Es ist zu sehen, dass der Unterschied beider mittlerer Halbachsen für $E_m \leq 12$ bei weniger als 1° liegt, was die Annahme eines kreisförmigen Ovals rechtfertigt. Für höhere Aktivitäten weicht das Oval zunehmend von einem Kreis ab. Da im vorliegenden Fall maximal ein Kp-Wert von 7+ angenommen wird, ist ein kreisförmiges Oval jedoch gut geeignet.

Anschließend wurde das Intensitätsmaximum des Polarlichtovals verwendet, um den Ra-

dius sowie das Zentrum zu bestimmen. Die Wahl fiel auf das Intensitätsmaximum, da die polnahe und äquaturnahe Grenze des Ovals aufgrund des schlechteren Signal-zu-Rausch Verhältnisses schlechter definiert ist.

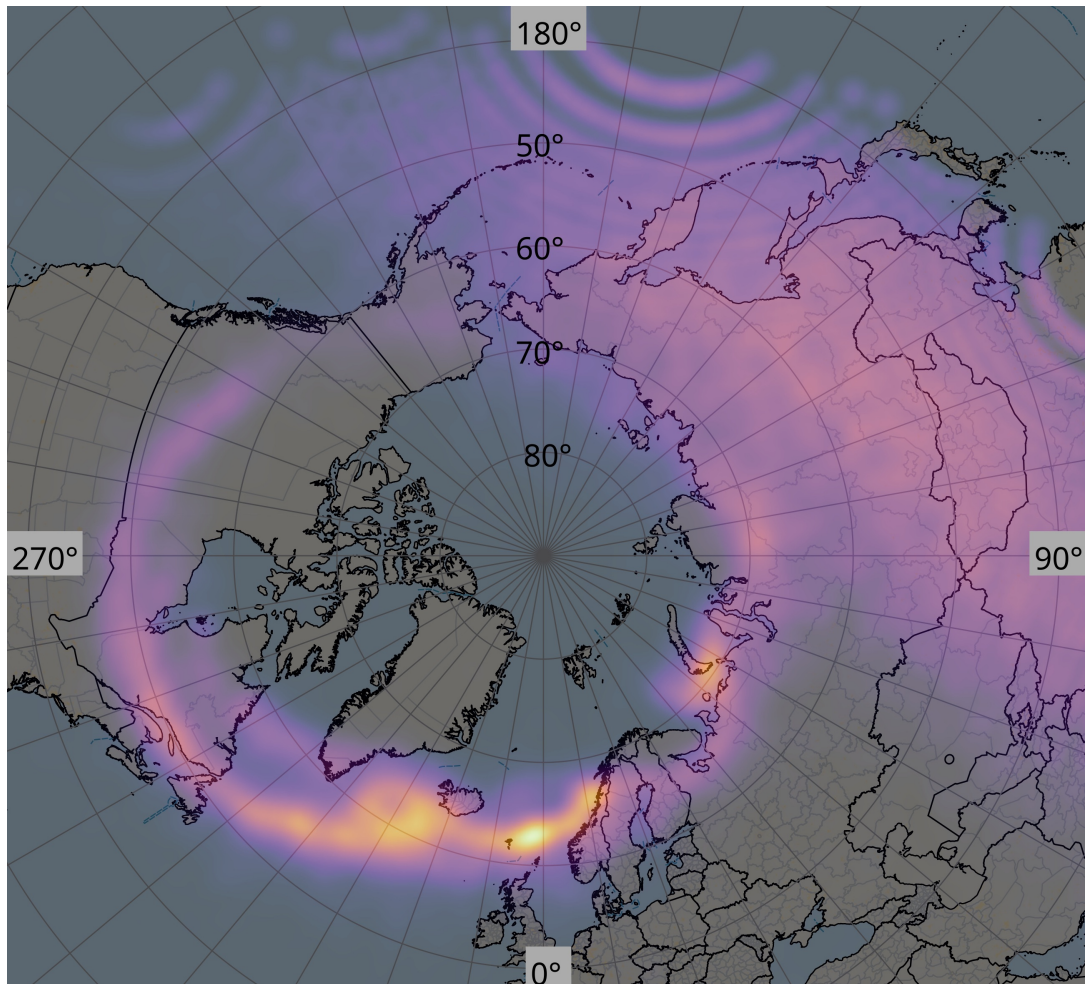


ABBILDUNG 3.4: Polregionen überlagert mit der DE1 Rohaufnahme vom 05.02.1982 02:25:54 UT. Im oberen rechten Bereich ist das Tagesleuchten zu sehen, welches für die weiteren Schritte eliminiert werden muss. Die grau hinterlegten Angaben spiegeln die geografische Länge wider. Die geografische Breite ist im oberen Bildbereich zu sehen.

In Abbildung 3.4 ist die Rohaufnahme vom 05.02.1982 um 02:25:54 UT gezeigt. Deutlich erkennbar sind im oberen rechten Bildbereich vom Tageslicht erzeugte helle Gebiete, die für die weitere Verarbeitung der Daten zunächst eliminiert werden müssen. Zu diesem Zweck wurde in QD-Koordinaten ein Konturplot der Aufnahme erstellt. Es folgte die manuelle Erstellung eines Polygonzugs um das eigentliche Oval, wobei alle Daten außerhalb des Polygons vernachlässigt wurden. Anschließend musste eine Kontur des Ovals ausgewählt werden, die zum einen möglichst schmal ist, aber zum anderen auch einen Großteil des Ovals abdecken sollte. Diese Kontur besteht aus einem Polygonzug, dessen

Eckpunkte bekannt sind (rote Kreuze in Abbildung 3.5), welche die Grundlage für die weitere Berechnung bilden.

Zunächst werden Geraden von jedem Eckpunkt zu allen übrigen Eckpunkten konstruiert. Für N Eckpunkte ergibt dies $N(N - 1)/2$ Geraden (blaue Linien in Abbildung 3.5). Zu all diesen Geraden werden die Mittelsenkrechten berechnet (rote Linien in Abbildung 3.5), wobei anschließend die Schnittpunkte der Mittelsenkrechten betrachtet werden. Für die gelbe Kontur in Abbildung 3.5 rechts, ergeben sich mit dieser Methode etwa $116 \cdot 10^6$ Schnittpunkte. Für einen perfekten Kreis wird erwartet, dass alle Schnittpunkte identisch sind und im Zentrum des Kreises zusammenfallen.

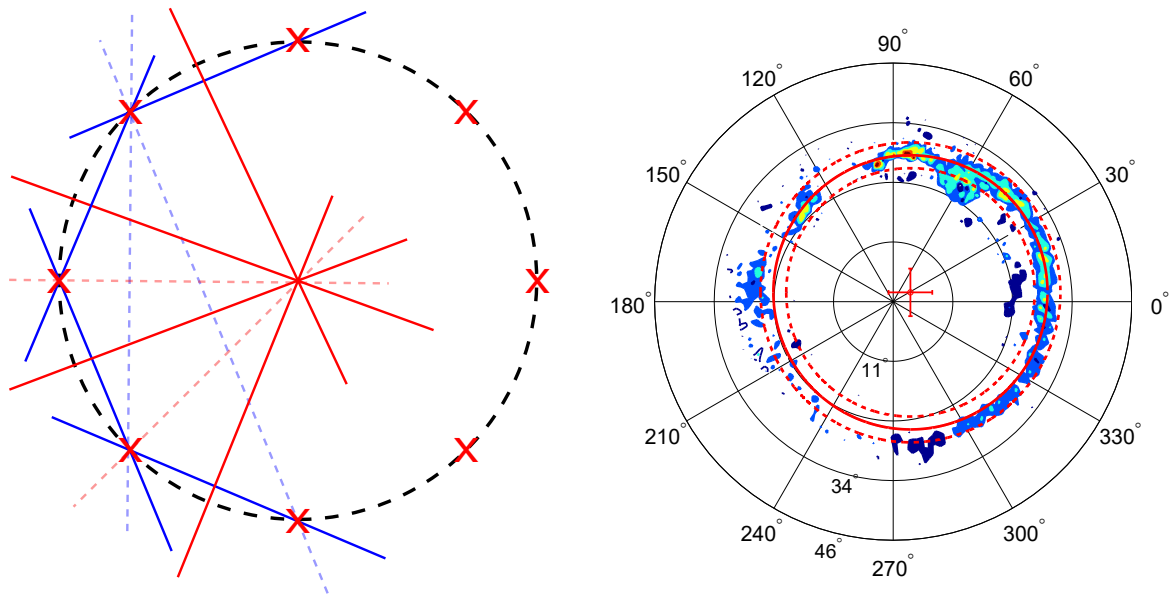


ABBILDUNG 3.5: Links: Das Vorgehen der Berechnung wird anhand eines Kreises dargestellt (vereinfachte Darstellung). Die roten Kreuze repräsentieren die Eckpunkte einer Kontur. Zwischen den Eckpunkten werden Geraden (blau) berechnet, um anschließend die Mittelsenkrechten (rot) zu ermitteln. Der Schnittpunkt spiegelt das Zentrum des Kreises wider. Rechts: Ergebnis der Rechnung für den 5. Februar 1982 um 02:25:54 UT ($K_p = 6$). Das Auroraoval ist als Konturplot in QD-Koordinaten gezeigt, wobei jede Kontur ein verschiedenes Intensitätslevel darstellt. Das Zentrum des Ovals ist leicht in Mitternachtsrichtung verschoben. Die durchgezogene rote Linie gibt den ermittelten Radius an, wobei die gestrichelten Linien die 1σ -Fehler darstellen. Das Oval wird innerhalb dieses Bereiches gut wiedergegeben.

Da die Konturen der Auroraovale auch in QD-Koordinaten keine perfekten Kreise darstellen, ergibt sich eine gewisse Streuung von Schnittpunkten. Um daraus das Zentrum des Ovals zu bestimmen, wurden Schnittpunkte außerhalb des Ovals vernachlässigt und anschließend der arithmetische Mittelwert berechnet. Aufgrund der Deformation der Magnetosphäre infolge des Zusammenspiels mit dem Sonnenwind, wird eine Verschiebung des Ovalzentrums in Mitternachtsrichtung erwartet. Dieser Effekt ist deutlich in Abbil-

dung 3.5 zu erkennen. Der Radius wurde als mittlerer Abstand aller Kontureckpunkte vom berechneten Zentrum ermittelt.

Berechnet wurde die Verschiebung und der Radius für 244 Aufnahmen im Sonnenmaximum (1981/82) und 220 Aufnahmen im Sonnenminimum (1986/87). Die einzelnen Daten finden sich in Anhang B in Tabelle B.2 und B.3. Für das gleiche Level der geomagnetischen Aktivität wurden die Radien und Verschiebungen gemittelt.

Ergebnisse der Satellitendaten

Für 464 Aufnahmen wurden Zentrum und Radius des Intensitätsmaximums des Polarlichtovals bestimmt. Im Folgenden kann durch Auftragen von Radius bzw. Verschiebung über dem Kp-Index eine Relation ermittelt werden. Nachstehend wird sich auf die Ergebnisse im Sonnenmaximum genauer bezogen.

Der Zusammenhang zwischen Radius r des Ovals und Kp-Index kann mit einem linearen Fit der Form

$$r = a \cdot Kp + b \quad (3.5)$$

ermittelt werden. Der Anstieg wird durch den Parameter a ($[a] = \text{deg/Kp}$) wiedergeben, wobei b ($b = r(0)$ und $[b] = \text{deg}$) dem erwarteten Radius für $Kp = 0$ entspricht. Der Radius des Ovals steigt linear mit dem Kp-Index. Lediglich die Werte für $Kp = 6$, $Kp = 8$ und $Kp = 9$ scheinen geringer als erwartet (siehe Abbildung 3.6). Im Falle von $Kp = 6$ fällt auf, dass viele der untersuchten Ovale eine Doppelstruktur aufweisen. Zu erkennen ist ein zweiter Polarlichtbogen innerhalb des eigentlichen, sodass das Intensitätsmaximum aufgespalten ist. Solch ein Fall wird durch ein einfaches Modell nicht hinreichend abgedeckt. Daher wurde der innere Polarlichtbogen vernachlässigt und die Rechnung erneut durchgeführt, was zu einem Radius führt, der in gutem Einklang mit einem linearen Fit ist. Für hohe Kp-Indizes (8 und 9) liegen zum einen nur wenige Aufnahmen vor, zum anderen ist das Oval auch sehr breit, weshalb keine genügend schmale Kontur gefunden werden konnte. Auch dies führt zu einer möglichen Verfälschung der Werte für starke geomagnetische Aktivität, wie sie auch von *Carbary* [2005] beschrieben wurde. Abbildung 3.6 zeigt die vernachlässigten Werte (blau) sowie die zum Fit beitragenden Werte (rot). Ohne Berücksichtigung der Radien für $Kp = 8$ und $Kp = 9$ sowie unter Verwendung des korrigierten Wertes für $Kp = 6$, ergibt sich ein linearer Fit mit einem angepassten R^2 von 0,976. Die berechneten Fitparameter können Tabelle 3.2 entnommen werden. Die meisten hier untersuchten Auroraovale wurden auf der nördlichen Hemisphäre beobachtet. Die Ergebnisse geben innerhalb der Auflösungsgrenze keinen Hinweis auf Unterschiede in den Hemisphären.

Beim Vergleich der hier gewonnenen Ergebnisse mit anderen Publikationen (siehe Ab-

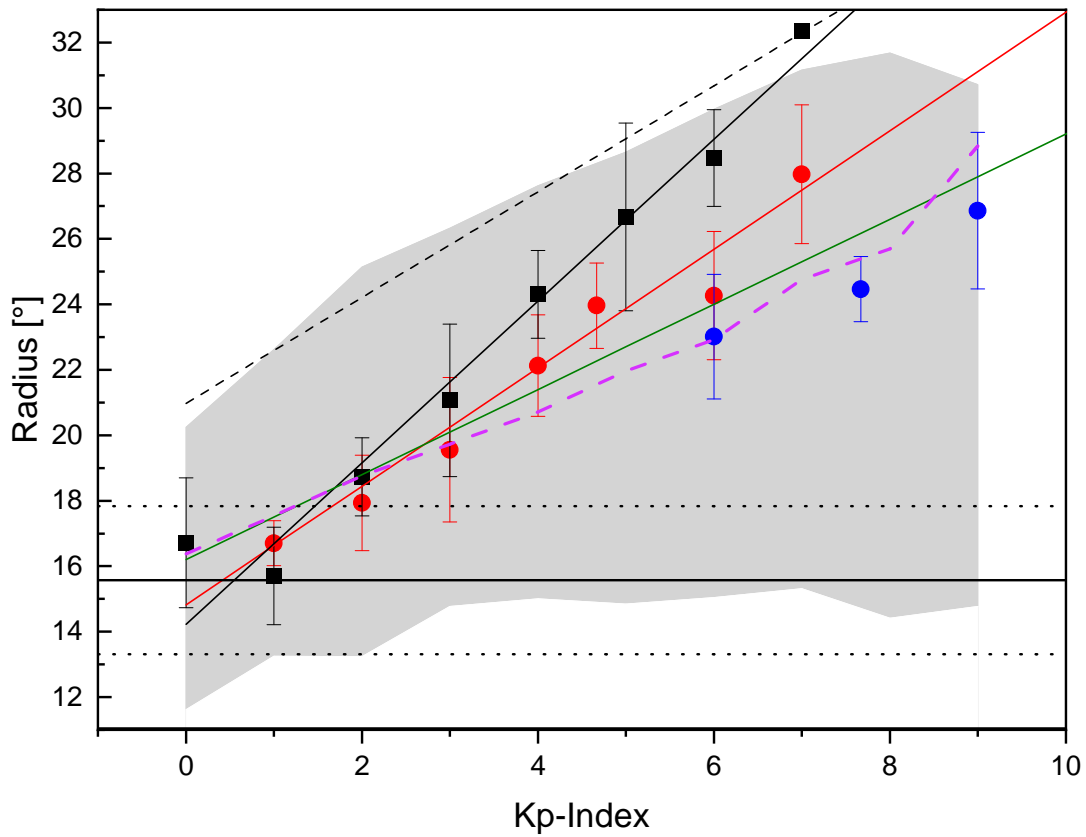


ABBILDUNG 3.6: Die roten und blauen Punkte zeigen die ermittelten Radien aus der vorliegenden Arbeit. Die blauen Punkte sind die vernachlässigten Werte für $K_p = 8$ und $K_p = 9$ sowie für $K_p = 6$ vor der Korrektur der Doppelstruktur. Die rote Linie zeigt das Ergebnis des linearen Fits im Vergleich mit den Ergebnissen aus *Milan et al.* [2009] (schwarze Quadrate mit linearem Fit), *Gussenhoven et al.* [1983] (schwarze gestrichelte Linie) und *Carbary* [2005] (grüne Linie). Der graue Bereich zeigt die Breite des Ovals zwischen der polnahen und äquatornahen Grenze nach *Holzworth et al.* [1975]. Die horizontale schwarze Linie repräsentiert den mittleren Radius für keine Aktivität aus *Xiong und Lühr* [2014] zusammen mit den 1σ -Fehlern. Dieser Wert deckt sich sehr gut mit den hier ermittelten Ergebnissen und denen, aus anderen Arbeiten. Zentral ist zudem eine violette gestrichelte Linie gezeigt, die das Intensitätsmaximum des Ovals nach dem Modell von *Zhang und Paxton* [2008] beschreibt.

bildung 3.6 und Tabelle 3.2) fallen Gemeinsamkeiten aber auch Abweichungen auf. Der in dieser Arbeit ermittelte Radius für $K_p = 0$ ist konsistent mit den Ergebnissen von *Milan et al.* [2009], weicht aber vom in *Gussenhoven et al.* [1983] veröffentlichten Wert ab. Der Grund dafür ist, dass die vorliegende Arbeit wie auch *Milan et al.* [2009] und *Carbary* [2005] das Intensitätsmaximum des Ovals benutzen. *Gussenhoven et al.* [1983] hingegen nutzten die äquaturnahe Grenze als Grundlage der Berechnungen. Ausgehend von einer durchschnittlichen Breite des Polarlichtovals von 10° [*Xiong et al.*, 2014] und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das Maximum der Intensität etwa in der Mitte

zwischen polnaher und äquaturnaher Grenze liegt, lässt sich auf etwa 5° größere Werte für die von *Gussenhoven et al.* [1983] ermittelten Radien schließen. Dies deckt sich mit den in Tabelle 3.2 dargestellten Werten.

TABELLE 3.2: In dieser Arbeit ermittelte Fitergebnisse für den Zusammenhang zwischen Radius und Kp-Index im Vergleich mit drei weiteren Publikationen.

	Anstieg [$^\circ$ /Kp]	Radius (Kp = 0) [$^\circ$]
Diese Arbeit (Sonnenmax.)	$1,81 \pm 0,25$	$14,82 \pm 0,80$
Diese Arbeit (Sonnenmin.)	$1,37 \pm 0,19$	$15,43 \pm 0,77$
<i>Milan et al.</i> [2009]	$2,47 \pm 0,25$	$14,22 \pm 1,04$
<i>Gussenhoven et al.</i> [1983]	$1,62 \pm 0,36$	$20,98 \pm 1,68$
<i>Carbary</i> [2005]	$1,26 \pm 0,29$	$16,18 \pm 4,30$

Weiterhin verwendeten *Gussenhoven et al.* [1983] den Geomagnetpol als Referenzwert. Durch die Mitternachtsverschiebung des Ovalzentrums ergeben sich unterschiedliche Kobreiten für verschiedene magnetische Lokalzeiten (MLT). Daher ermittelten *Gussenhoven et al.* [1983] Fitparameter für den Zusammenhang zwischen Radius und Kp-Index in 24 MLT-Abschnitten. Um dies mit der vorliegenden Arbeit vergleichen zu können, wurden die 24 verschiedenen Anstiege sowie Radien für Kp = 0 gemittelt. Der so ermittelte Anstieg deckt sich sehr gut mit den hier berechneten Werten. *Milan et al.* [2009] erwarten jedoch einen steileren Radiusanstieg mit steigendem Kp.

In *Milan et al.* [2009] werden Diagramme gezeigt, die veranschaulichen, wie sich der Radius des Ovals mit der Zeit ändert. Die entsprechenden Kp-Indizes für die dargestellten Zeiträume wurden identifiziert, um erneut zu untersuchen, wie der Radius vom Level der geomagnetischen Aktivität abhängt. Fitten mit demselben linearen Modell wie zuvor führte zu den in Tabelle 3.2 präsentierten Werten. Ähnlich zu der vorliegenden Arbeit wurde auch von *Milan et al.* [2009] ein Koordinatensystem verwendet, in dem das Oval gut durch einen Kreis approximiert werden kann. Der Hauptunterschied besteht jedoch in der Berechnung der Radien. *Milan et al.* [2009] legten Kreise um ein vordefiniertes Zentrum und variierten den Radius. Für jeden Radius wurde dabei die Helligkeit entlang des Kreises aufsummiert. Der beste Fit wurde für die Maximalhelligkeit angenommen. Im Vergleich dazu wird in der hier beschriebenen Methode das Zentrum nicht festgesetzt, sondern bleibt ein freier Parameter. Dies kann zu den großen Unterschieden im Anstieg führen. Des Weiteren wurden in *Milan et al.* [2010] Aufnahmen in einem bestimmten Kp-Intervall gemittelt, bevor der Radius bestimmt wurde. Dieses mittlere Oval hat eine größere Ausdehnung als die Einzelovale, da sich deren Position leicht verschiebt und nicht in jedem Fall mit dem festgesetzten Zentrum übereinstimmt. Dasselbe gilt für *Carbary*

[2005]. Das Zentrum wie in der vorliegenden Arbeit als freien Parameter beizubehalten, ist folglich der zu präferierende Weg. Beim Vergleich von *Milan et al.* [2009] und *Milan et al.* [2010] fällt auf, dass die Grafiken des variierenden Radius in der ersten Arbeit Radien des Helligkeitsmaximums um 15° zulassen. Dies wird durch die abgeleiteten Ergebnisse bestätigt. In *Milan et al.* [2010] hingegen zeigen die Abbildungen, dass für einen Kp-Index von 0 die Spitzenintensität um 68° liegt, was auf größere Ovalradien schließen lässt.

Carbary [2005] nutzen ebenfalls lineare Fits in 24 MLT-Bereichen, ähnlich zu *Gussenhoven et al.* [1983]. Wie zuvor werden auch hier die Mittelwerte der Fitparameter für den Vergleich mit den Ergebnissen aus dieser Arbeit herangezogen. Sowohl der Radius für $K_p = 0$ als auch der Anstieg ist konsistent mit den hier ermittelten Resultaten. Letzterer weicht allerdings vom hier ermittelten Anstieg im Sonnenmaximum leicht ab.

Im Vergleich zu dem von *Holzworth et al.* [1975] entwickelten mathematischen Modell des Auroraovals, welches in Abschnitt 4.1.1 noch genauer erklärt wird, zeigen sich gute Übereinstimmungen. Die größte Ausdehnung der äquatornahen Grenze sowie die geringste Ausdehnung der polnahen Grenze wurden für Vergleichszwecke genutzt. Wie zu erwarten, ist die äquatornahe Grenze etwa 5° größer als der hier ermittelte Radius des Intensitätsmaximums, stimmt aber sehr gut mit den Ergebnissen aus *Gussenhoven et al.* [1983] überein. Nichtsdestotrotz ist der Anstieg mit den präsentierten Werten konsistent. Die polnahe Grenze hingegen zeigt einen deutlich flacheren Anstieg, da sie weniger vom Kp-Index abhängt. Die ermittelten Werte sowie die Ergebnisse aus anderen Arbeiten können in Abbildung 3.6 miteinander verglichen werden. Erkennbar ist, dass die Daten von *Gussenhoven et al.* [1983] und die berechnete äquatornahe Grenze aus *Holzworth et al.* [1975] sehr gut übereinstimmen. Die Radiuszunahme mit steigendem Kp-Index deckt sich mit Ergebnissen dieser Arbeit. Abbildung 3.6 zeigt zudem das Intensitätsmaximum aus dem Ovalmodell nach *Zhang und Paxton* [2008], welches ebenfalls in Kapitel 4.1.1 genauer erklärt wird. Das Intensitätsmaximum deckt sich gut mit den Ergebnissen aus dieser Arbeit und den Resultaten aus *Carbary* [2005]. Zudem kann man für hohe Aktivität erkennen, dass das Intensitätsmaximum aus dem Modell nach *Zhang und Paxton* [2008] beinahe an die äquatornahe Grenze des Holzworth-Modells heranreicht. Daraus wird ersichtlich, dass das Modell nach *Zhang und Paxton* [2008] eine größere Ovalausdehnung beschreibt.

Der Radius für $K_p = 0$ kann direkt mit den Resultaten für $E_m = 0$ von *Xiong und Lühr* [2014] verglichen werden. Anhand der Ellipsenparameter ist es möglich, den Radius des Ovals zu 24 magnetischen Lokalzeiten zu berechnen. Anschließendes Mitteln über diese 24 Werte, gefolgt von erneutem Mitteln über alle vier Ovalgrenzen, ergibt einen Radius für $K_p = 0$ von $r = (15,57 \pm 2,26)^\circ$. Das Mitteln von polnaher und äquatornaher Grenze

stellt sicher, dass die Werte mit den hier errechneten Werten für das Intensitätsmaximum vergleichbar sind. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung sowohl mit den hier gegebenen Ergebnissen, als auch mit denen aus anderen Arbeiten.

Für die Verschiebung des Ovalzentrums in Mitternachtsrichtung werden verschiedene Werte in der Literatur angegeben. Diese reichen von 3° in *Akasofu* [2009] bis zu 5° in *Milan et al.* [2009]. Die ermittelten Ovalzentren für verschiedene Aktivität können direkt miteinander verglichen werden. Da sich kein eindeutiger Trend zeigt, wurde das arithmetische Mittel aller Ergebnisse verwendet, wobei sich eine Verschiebung von $(4,49 \pm 0,87)^\circ$ im Sonnenmaximum ergibt. Erneut kann zum Vergleich die Arbeit von *Xiong und Lühr* [2014] herangezogen werden. Auch hier wird zwischen beiden Ovalgrenzen auf beiden Hemisphären unterschieden. Beim Plotten der Verschiebung gegen E_m wird ersichtlich, dass die Verschiebung der polnahen Grenze abnimmt, wohingegen jene der äquatornahen Grenze zunimmt (Abbildung 3.7 links). Die hier ermittelten Ergebnisse zeigen keinen klaren Trend, weshalb es denkbar ist, dass sich beide Effekte für das Intensitätsmaximum gerade kompensieren. Wie zuvor lassen sich die Ergebnisse aus *Xiong und Lühr* [2014] für eine Aktivität von 0 direkt mit den hier ermittelten Werten vergleichen. Die mittlere Verschiebung aus beiden Grenzen auf beiden Hemisphären beläuft sich auf $(4,20 \pm 0,17)^\circ$ und ist innerhalb des Fehlers konsistent mit dem hier errechneten Wert (Abbildung 3.7 rechts).

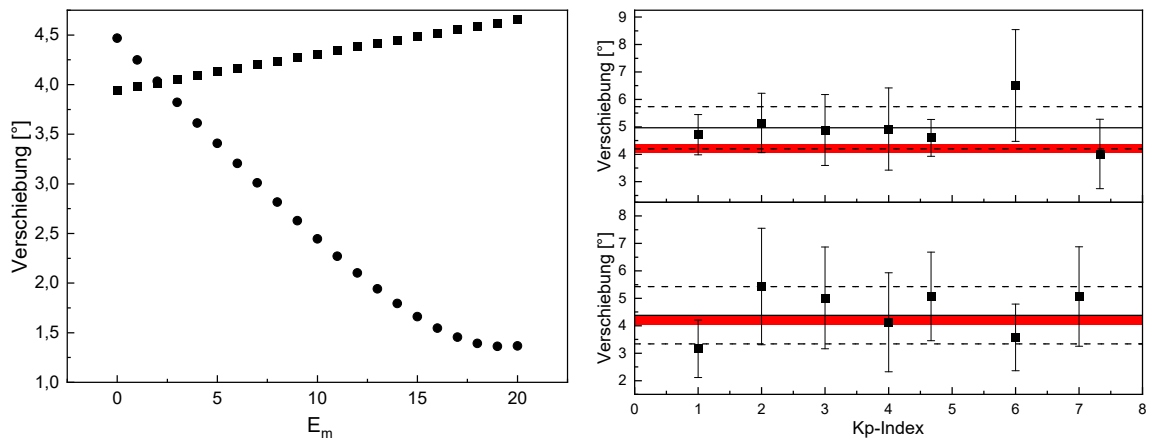


ABBILDUNG 3.7: Links: Verschiebung der äquatornahen (Quadrate) und polnahen Grenze (Kreise) mit steigender Aktivität. Rechts: Vergleich der Ergebnisse der Verschiebung im Sonnenminimum (oben) und -maximum (unten). Gezeigt ist die mittlere Verschiebung (schwarze Linie) zusammen mit den 1σ -Fehlern (gestrichelte Linien). Die roten Bereiche zeigen die mittlere Verschiebung beider Hemisphären aus *Xiong und Lühr* [2014].

Um sicherzustellen, dass der Sonnenzyklus keine Einflüsse auf die Ergebnisse hat, wurden im Zeitraum von 1986 und 1987, also im Sonnenminimum, 220 Aufnahmen untersucht (siehe Anhang B Tabelle B.1). Wieder zeigt sich ein linearer Anstieg des Radius

mit zunehmender Aktivität. In Abbildung 3.8 sind die Ergebnisse dieser Arbeit im Sonnenminimum und -maximum zu sehen. Die Unterschiede sind für geringe Aktivitäten zu vernachlässigen. Mit steigender Aktivität nehmen die Diskrepanzen zu, bleiben aber innerhalb der Fehler konsistent. Das CH-Aurora-2014-Modell prognostiziert eine Saturation des Radius bei steigender Aktivität. Die maximale Ausdehnung der polnahen und äquaturnahen Grenze liegt bei 19° bzw. 30° . Für das Intensitätsmaximum folgt daraus ein maximaler Radius von $24,5^\circ$. Beim Blick auf Abbildung 3.8 fällt auf, dass der hier ermittelte Radius im Sonnenmaximum für $K_p = 7$ zu hoch ist.

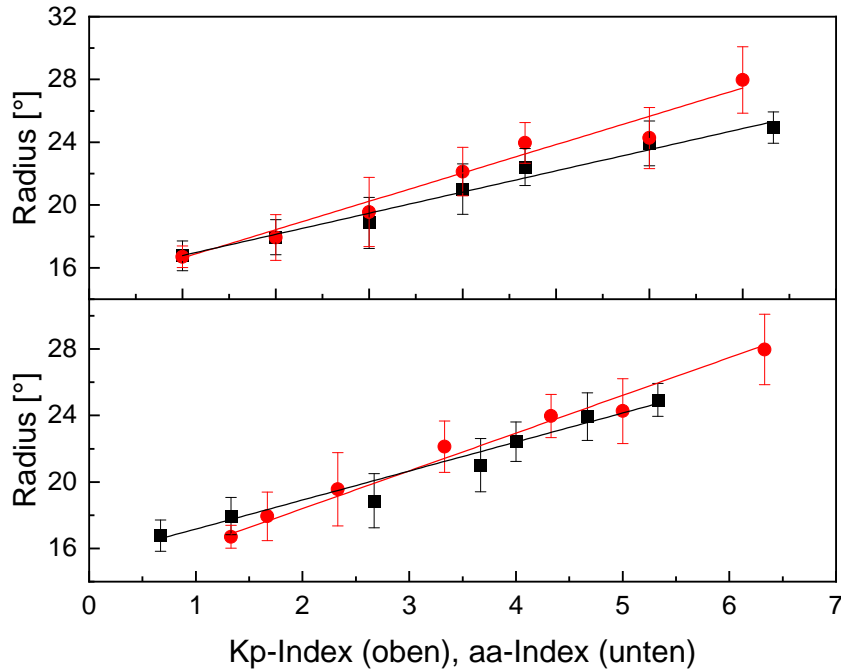


ABBILDUNG 3.8: Vergleich der Ergebnisse im Sonnenminimum (schwarz) und Sonnenmaximum (rot) mit steigendem Kp-Index (oben) sowie steigendem aa-Index (unten).

Wird dieser Wert zu $24,5^\circ$ verschoben, was innerhalb der Fehler legitim ist, ergibt sich eine noch bessere Übereinstimmung der Ergebnisse von Sonnenminimum und Sonnenmaximum. Jedoch gilt es zu beachten, dass es mögliche Unterschiede in der Position der von CHAMP gemessenen feldparallelen Ströme und der UV-Emission in den Polarlichtaufnahmen gibt, was diese geringen Unterschiede erklären kann. Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Vergleich mit dem aa- statt Kp-Index. Innerhalb der Fehler sind die Ergebnisse für beide Phasen des Sonnenzyklus konsistent: $r_{max} = (2,3 \pm 0,3)^\circ \cdot aa + (13,9 \pm 0,9)^\circ$ und $r_{min} = (1,7 \pm 0,3)^\circ \cdot aa + (15,4 \pm 0,9)^\circ$.

Auch im Falle der Verschiebung ergeben sich ähnliche Werte für Sonnenminimum und Sonnenmaximum. Im Minimum ergibt sich eine Verschiebung von $(4,97 \pm 0,77)^\circ$, wobei hier kein Trend erkennbar ist.

Kapitel 4

Rekonstruktion des Polarlichtovals aus bodengebundenen Sichtungen

In diesem Abschnitt wird darauf eingegangen, wie mittels der Bayes-Inferenz das Polarlichtoval aus bodengebundenen Beobachtungen rekonstruiert werden kann. Damit können Aussagen über den Kp-Index sowie die Position des Pols in korrigierten geomagnetischen Koordinaten (CGM) getroffen werden. Die entwickelte Methode wird an künstlich erstellten Sichtungen sowie zwei modernen Geomagnetstürmen von 2003 und 2015 getestet. Anschließend wird das Verfahren auf neun historische geomagnetische Stürme zwischen 1716 und 1882 angewendet.

4.1 Bayessche Statistik

Bei der bayesschen Inferenz ist ein zentrales Ziel, unbekannte Parameter eines Modells mit Hilfe gegebener Daten zu ermitteln. Gesucht ist also die Wahrscheinlichkeit eines Modells unter den gegebenen Daten. In der klassischen Statistik werden Parameter aus einer möglichst großen Stichprobe bestimmt. Dabei sind die Parameter zunächst zwar unbekannt, haben aber einen festen Wert [Held, 2008]. Ein Beispiel wäre das arithmetische Mittel. Im Gegensatz zur Bayes-Statistik ist also die Wahrscheinlichkeit der Daten unter dem gegebenen Modell gesucht. Die Bayes-Statistik beantwortet in den meisten Fällen die Frage, wie wahrscheinlich ein Modell oder eine Hypothese unter den bekannten Daten ist. In der frequentistischen Statistik hingegen wird berechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Modell die gemessenen Daten erzeugt hat. Dies ist in vielen Fällen jedoch nicht die eigentliche Frage. In der Bayes-Inferenz werden Parameter als Zufallsvariablen aufgefasst, die einer a-priori-Verteilung genügen. Im Folgenden sind stets Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen gemeint, wenn von Verteilungen gesprochen wird.

Unter Zuhilfenahme der Daten kann daraus eine a-posteriori-Verteilung erzeugt werden [Held, 2008]. Im Gegensatz zur klassischen Statistik wird also die Wahrscheinlichkeit des Modells unter den gegebenen Daten bestimmt. Im Falle der Polarlichter sollen bodengebundene Beobachtungsdaten genutzt werden, um die Parameter der in Abschnitt 4.1.1 behandelten Modelle des Polarlichtovals zu bestimmen.

Grundlage der Bayes-Inferenz ist der Satz von Bayes [Bayes, 1764]:

$$f(M|D, I) = \frac{f(D|M, I) f(M|I)}{f(D|I)}. \quad (4.1)$$

Hierbei ist M ein Modell (hier ein Modell des Auroraovals), D sind Messdaten (hier bodengebundene Aurorabeobachtungen) und I ist das Vorwissen, welches beispielsweise als Intervall der Modellparameter eingehen kann. $f(M|I)$ ist die a-priori-Verteilung der Parameter, wohingegen $f(M|D, I)$ die gesuchte a-posteriori-Verteilung ist. $f(D|M, I)$ ist die sogenannte Likelihood. Der Term $f(D|I)$ im Nenner kann als Normierungskonstante aufgefasst werden und ist unabhängig von M . Für die Berechnung von Parametern ist er daher nicht notwendig [D’Agostini, 2003] und es gilt:

$$f(M|D, I) \propto f(D|M, I) f(M|I). \quad (4.2)$$

Die Bayes-Statistik arbeitet also mit bedingten Wahrscheinlichkeiten. Die Terme $f(D|M, I)$ und $f(M|I)$ werden im Folgenden als “Datenmodell” bzw. “Ovalmodell” bezeichnet, wobei hier zunächst das a-priori-Ovalmodell gemeint ist. Nach Held [2008] gilt für bedingte Wahrscheinlichkeiten außerdem:

$$f(D|M, I) = \frac{f(M, D, I)}{f(M, I)}. \quad (4.3)$$

Oder anders ausgedrückt: $f(M, D, I) = f(D|M, I) f(M, I)$. Hierbei ist $f(M, D, I)$ eine multivariate Verteilung.

Typischerweise gehen in die Modelle statistische Parameter ψ (dies sind die Parameter der a-priori-Verteilung) sowie physikalische Parameter ω (dies sind die Parameter des Ovalmodells) mit ein [Campbell, 2004]. Diese waren zuvor in Form des Vorwissens I beschrieben. Unter Zuhilfenahme von Gleichung 4.3 ergibt sich:

$$\begin{aligned} f(M, D, \psi, \omega) &= f(D|M, \psi, \omega) f(M, \psi, \omega) \\ &= \underbrace{f(D|M, \psi, \omega)}_{1.} \underbrace{f(M|\psi, \omega)}_{2.} \underbrace{f(\psi, \omega)}_{3.}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

1. Datenmodell: Ausgehend von der Annahme, dass keine weiteren Informationen über die physikalischen Parameter ω bekannt sind, kann dieser Term zu $f(D|M, \psi)$ vereinfacht werden.
2. a-priori-Ovalmodell: Es wird angenommen, dass die statistischen Parameter ψ keine Informationen über das Ovalmodell enthalten. Daher gilt: $f(M|\omega)$.
3. a-priori-Parametermodell: Anwenden von Gleichung 4.3 liefert: $f(\psi, \omega) = f(\omega|\psi) f(\psi)$. Weiterhin seien die statistischen und physikalischen Parameter unabhängig voneinander, was zu $f(\omega|\psi) = f(\omega)$ führt. Damit ergibt sich schließlich: $f(\psi, \omega) = f(\psi) f(\omega)$.

Mit diesen Annahmen ergibt sich für die multivariate Verteilung:

$$f(M, D, \psi, \omega) = f(D|M, \psi) f(M|\omega) f(\psi) f(\omega). \quad (4.5)$$

Die genutzten Modelle des Polarlichtovals werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

4.1.1 Modelle des Polarlichtovals

Für die Bayes-Statistik wird ein Modell des Polarlichtovals benötigt, um theoretische Werte zu berechnen, die schlussendlich mit den Beobachtungsdaten verglichen werden. Zwei verschiedene Modelle wurden dabei genutzt. Zum einen das Modell nach *Holzworth et al.* [1975] und zum anderen das Modell nach *Zhang und Paxton* [2008]. In beiden Fällen besitzen die Modelle drei freie Parameter, die im Rahmen der Bayes-Inferenz unter Nutzung der Beobachtungsdaten ermittelt werden sollen. Diese sind die geografische Länge und Breite des CGM-Pols sowie der Kp-Index. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass weitere Modelle zur Beschreibung des Polarlichtovals existieren. Darunter das in Abschnitt 3.2.2 erwähnte CH-Aurora-2014-Modell [*Xiong und Lühr*, 2014] oder das Ovation-Prime-Modell [*Newell et al.*, 2009], welches hauptsächlich für Polarlichtvorhersagen genutzt wird. Diese Modelle nutzen jedoch das verschmelzende elektrische Feld bzw. Sonnenwindparameter zur Beschreibung der Lage des Auroraovals und werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht genutzt.

Modell des Polarlichtovals nach *Holzworth et al.* [1975]:

Das hier beschriebene Modell basiert auf den mathematischen Ausarbeitungen von *Holzworth et al.* [1975] und wurde von *Starkov* [1994] mit dem AL-Index in Verbindung gebracht. Wie von *Starkov* [1994] beschrieben, kann der AL-Index über nachstehende Formel mit dem Kp-Index verknüpft werden:

$$AL = c_0 + c_1 \cdot Kp + c_2 \cdot Kp^2 + c_3 \cdot Kp^3. \quad (4.6)$$

Die Koeffizienten c_i sowie die im weiteren Verlauf benötigten Koeffizienten b_i ($i = 0, 1, 2, 3$) sind im Anhang in Abschnitt C zu finden. Dabei wird sich auf die Angabe der Koeffizienten zur Berechnung der äquatornahen Grenze des Ovals beschränkt, da nur diese im weiteren Verlauf eine Rolle spielen.

Die korrigierte geomagnetische Kobreite Θ setzt sich zusammen aus drei Harmonischen, Amplituden und Phasen, die vom AL-Index abhängen. Im Grunde handelt es sich um eine kreisförmige Approximation mit einer Fourier-Komponente [Korte und Stolze, 2016]. Es gilt:

$$\Theta = A_0 + A_1 \cos[15(t + \alpha_1)] + A_2 \cos[15(2t + \alpha_2)] + A_3 \cos[15(3t + \alpha_3)]. \quad (4.7)$$

Die Koeffizienten A_i sind die Amplituden im Gradmaß, t ist die magnetische lokale Zeit (MLT) in Stunden und α_j sind die Phasen, ebenfalls in Stunden. A_i und α_j berechnen sich dabei aus,

$$\begin{aligned} A_i &= b_0 + b_1 \log_{10} |AL| + b_2 \log_{10}^2 |AL| + b_3 \log_{10}^3 |AL|; \\ \alpha_j &= b_0 + b_1 \log_{10} |AL| + b_2 \log_{10}^2 |AL| + b_3 \log_{10}^3 |AL|, \end{aligned} \quad (4.8)$$

wobei für A_i und α_j verschiedene Koeffizienten b zu verwenden sind. Hierbei ist $i = 0, 1, 2, 3$ und $j = 1, 2, 3$.

Das Holzworth-Modell basiert auf den Feldsteinovalen, die nach dem IGY aus All-Sky-Kameraaufnahmen bestimmt wurden. Es ist demnach davon auszugehen, dass mit diesem Modell auch die in dieser Arbeit genutzten bodengebundenen Beobachtungen beschrieben werden können.

Modell des Polarlichtovals nach *Zhang und Paxton [2008]*:

Ein weiteres Modell des Polarlichtovals wurde 2008 von *Zhang und Paxton [2008]* anhand von UV-Beobachtungen mit dem Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED)/Global Ultraviolet Imager (GUVI) erstellt. Beobachtungsdaten von 2002 bis 2005 führten zu einem empirischen Modell (ZP-Modell), welches die Gesamtenergie E_0 sowie den Energiefluss der Elektronen Q beschreibt. Wie in *Zhang und Paxton [2008]* beschrieben, werden Epstein-Funktionen genutzt, um den Elektronenenergiefluss Q zu berechnen, der in dieser Arbeit verwendet wird. Es gilt

$$Q_j = \frac{A_{0j} \cdot \exp((\Theta - A_{1j})/A_{2j})}{[1 + \exp((\Theta - A_{1j})/A_{3j})]^2}. \quad (4.9)$$

Wie zuvor beschreibt Θ die korrigierte geomagnetische Kobreite. Es gilt weiterhin $j = 0, 1, \dots, 5$ wobei der Index j auf Kp-Subintervalle mit den Zentralwerten $k_j = \{0,75; 2,25; 3,75; 5,25; 7,00; 9,00\}$ verweist. Die Koeffizienten A_{ij} können anhand von

$$A_{ij} = a_{0j} + \sum_{k=1}^6 \left[a_{kj} \cdot \cos\left(\frac{k\pi t}{12}\right) + b_{kj} \cdot \sin\left(\frac{k\pi t}{12}\right) \right] \quad (4.10)$$

berechnet werden. Die Koeffizienten a_{kj} und b_{kj} sind im Anhang in Abschnitt C zu finden. Wie im Falle von *Holzworth et al.* [1975] ist t die magnetische lokale Zeit (MLT) in Stunden. Für Kp-Werte, die nicht mit den Zentralwerten der Subintervalle zusammenfallen, ist eine nichtlineare Interpolation notwendig. Hierbei gilt

$$Q = f_j \cdot Q_j + f_{j+1} \cdot Q_{j+1}, \quad (4.11)$$

wobei j und $j + 1$ auf die angrenzenden Kp-Subintervalle verweisen, für die $k_j \leq Kp \leq k_{j+1}$ gilt. f_j und f_{j+1} errechnen sich nach

$$f_j = \frac{HP(k_{j+1}) - HP(Kp)}{HP(k_{j+1}) - HP(k_j)} \quad \text{und} \quad f_{j+1} = \frac{HP(Kp) - HP(k_j)}{HP(k_{j+1}) - HP(k_j)} \quad (4.12)$$

mit der hemisphärischen Leistung HP ($[HP] = \text{GW}$). Die hemisphärische Leistung ist eine weitere Möglichkeit, Polarlichtaktivität zu messen. Die einfallenden Teilchen geben ihre kinetische Energie in der Atmosphäre durch Stöße ab. Nach Integration der eingebrachten Energie über beide Hemisphären ergibt sich die hemisphärische Leistung [*Fuller-Rowell und Evans*, 1987], die durch nachstehende Formeln mit dem Kp-Index verknüpft ist:

$$\begin{aligned} HP(Kp) &= 38,66 \cdot \exp(0,1967 \cdot Kp), & Kp \leq 5,0; \\ HP(Kp) &= 4,592 \cdot \exp(0,4731 \cdot Kp), & Kp > 5,0. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Zu guter Letzt ist noch eine Skalierung der ermittelten Energieflüsse Q notwendig. Dies geschieht über die Berechnung des maximalen Energieflusses Q_{\max} nach

$$Q_{\max} = d_0 + d_1 \cdot Kp + d_2 \cdot Kp^2 + d_3 \cdot Kp^3 + d_4 \cdot Kp^4. \quad (4.14)$$

Die Werte d_i sind in Anhang C zu finden.

Als polnahe und äquatornahe Grenze werden die Bereiche definiert, an denen der Energiefluss bei einem Wert von $0,25 \text{ erg/s/cm}^2$ liegt. Daraus folgt direkt die korrigierte geomagnetische Kobreite Θ der äquatornahen Grenze. Die korrigierte geomagnetische Länge

ϕ lässt sich nach Gleichung 4.17 berechnen. Beispiele des Modells für $K_p = 2$ und $K_p = 5$ sind in Abbildung 4.1 zu sehen.

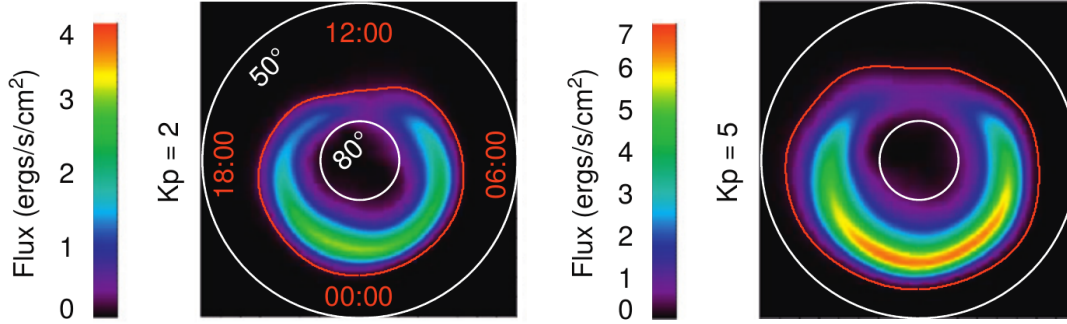


ABBILDUNG 4.1: Die Verteilung des Elektronenenergieflusses für zwei Level der magnetischen Aktivität. Die rote Linie beschreibt die äquatornahe Grenze bei einem Elektronenenergiefluss von $0,25 \text{ erg/s/cm}^2$ [Zhang und Paxton, 2008].

Anschließend wird eine Transformation zu geographischen Koordinaten durchgeführt, wie sie im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

Da das ZP-Modell auf Messungen des Elektronenenergieflusses beruht, in dieser Arbeit aber bodengebundene Beobachtungen genutzt werden, ist zu prüfen, inwiefern sich die Grenzen des ZP-Ovals mit den tatsächlich beobachteten Grenzen des Polarlichtovals decken. Nach Kosar *et al.* [2018], die bodengebundene Amateurbeobachtungen der Polarlichter mit der äquatornahen Grenze des ZP-Modells bei $0,2 \text{ erg/s/cm}^2$ vergleichen, ergab sich eine gute Übereinstimmung der Grenze mit der Position der beobachteten Aurorae von 68 %. Der Unterschied in der Definition des Grenzflusses von $0,05 \text{ erg/s/cm}^2$ hat nur sehr geringe Auswirkungen auf die geografische Position der Grenze ($\sim 0,5^\circ$), weshalb die resultierenden Effekte vernachlässigt werden können. Kosar *et al.* [2018] nahmen für ihre Berechnungen an, dass die Polarlichter stets im Zenit beobachtet wurden. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass Aurorae, insbesondere in mittleren Breiten, bei geringen Höhen am nördlichen Horizont beobachtet wurden. Daraus folgt, dass die eigentliche Polarlichtposition in vielen Fällen nördlich der Beobachterposition liegt, was zu einer noch besseren Übereinstimmung zwischen äquatornaher Grenze des ZP-Modells und bodengebundenen Sichtungen führt.

Koordinatentransformation:

Die beiden eben vorgestellten Modelle des Polarlichtovals beschreiben die Lage der polnahen und äquatornahen Grenzen in korrigierten geomagnetischen Koordinaten (CGM-Koordinaten; siehe Holzworth *et al.* [1975], Zhang und Paxton [2008]). Um CGM-Koordinaten zu berechnen, ist nach Laundal *et al.* [2017], analog zu den Ausführungen in Abschnitt 3.2.2, das Verfolgen von Feldlinien notwendig. Die CGM-Koordinaten eines

Punktes P_0 werden berechnet, indem die den Punkt P_0 schneidende Feldlinie bis zur Äquatorebene der geomagnetischen Koordinaten verfolgt wird. Um die Breite ϑ_{cgm} in CGM-Koordinaten zu finden, wird als Referenz ein Erdradius R_E genutzt.

$$\vartheta_{\text{cgm}} = \pm \arccos \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\text{äq}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

Dabei ist $h_{\text{äq}}$ die Höhe, bei der die Feldlinie die Äquatorebene der geomagnetischen Koordinaten schneidet. Die Länge ϕ_{cgm} ist die Länge des Schnittpunktes. Anhand der Definition ist klar, dass sich CGM-Koordinaten nur wenig von den in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen QD-Koordinaten unterscheiden. Zur korrekten Umrechnung zwischen CGM und geografischen Koordinaten, in denen die Beobachtungsdaten gegeben sind, ist also ein Magnetfeldmodell, was Lage und Form der Feldlinien angibt, erforderlich. Ziel dieser Arbeit ist es jedoch, die Position des CGM-Pols zu bestimmen. Unter Berücksichtigung eines Feldmodells würde allerdings die Position des CGM-Pols bereits vorgeben werden, was dem Ziel widersprechen würde. Zudem soll die Methode auf historische Geomagnetstürme ausgeweitet werden, für die kein ausreichend genaues Referenzfeld (analog zum IGRF-12 [Thebault et al., 2015]) zur Verfügung steht. Daher ist im Rahmen dieser Arbeit eine Beschränkung auf die in Sigernes et al. [2011] gegebene Transformation erforderlich. Hier wird angenommen, dass die Modelle zwar als Referenzpunkt den Pol in CGM-Koordinaten aufweisen, jedoch wird eine einfache Rotation des Koordinatensystems hin zu geografischen Koordinaten durchgeführt. Die Unterschiede in der geografischen Position der äquatornahen Grenze belaufen sich zwischen den verschiedenen Transformationen auf wenige Grad. Zum Umrechnen der aus den Modellen ermittelten Kobreite Θ wird zunächst von sphärischen in kartesische Koordinaten übergegangen. Dies geschieht nach den folgenden Formeln:

$$\begin{aligned} x_m &= \sin \Theta \cdot \cos \phi; \\ y_m &= \sin \Theta \cdot \sin \phi; \\ z_m &= \cos \Theta. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Dabei sind Θ und ϕ die korrigierte geomagnetische Kobreite bzw. Länge. Letztere wird über

$$\phi = \frac{2\pi t}{24} + \Delta\phi(t) \quad (4.17)$$

berechnet. Der Ausdruck $\Delta\phi(t)$ beschreibt dabei die Differenz zwischen der Länge des CGM-Pols in geografischen Koordinaten und dem subsolaren Punkt. Dieser Term trägt also zur korrekten Orientierung des Ovals bei. Nach Drehung des Vektors (x_m, y_m, z_m) mittels der Drehmatrix R , ergeben sich die kartesischen Koordinaten (x_g, y_g, z_g) im geografischen System:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \phi_0 \cdot \cos \Theta_0 & -\sin \phi_0 & \cos \phi_0 \cdot \sin \Theta_0 \\ \sin \phi_0 \cdot \cos \Theta_0 & \cos \phi_0 & \sin \phi_0 \cdot \sin \Theta_0 \\ -\sin \Theta_0 & 0 & \cos \Theta_0 \end{pmatrix}. \quad (4.18)$$

Hierbei ist ϕ_0 die geografische Länge des CGM-Pols und Θ_0 die geografische Kobreite des CGM-Pols. Für die geografische Breite der Ovalgrenze ϑ_g und Länge ϕ_g folgt dann:

$$\vartheta_g = \frac{\pi}{2} - \arccos(z_g); \quad \phi_g = \pm \arctan\left(\frac{y_g}{x_g}\right). \quad (4.19)$$

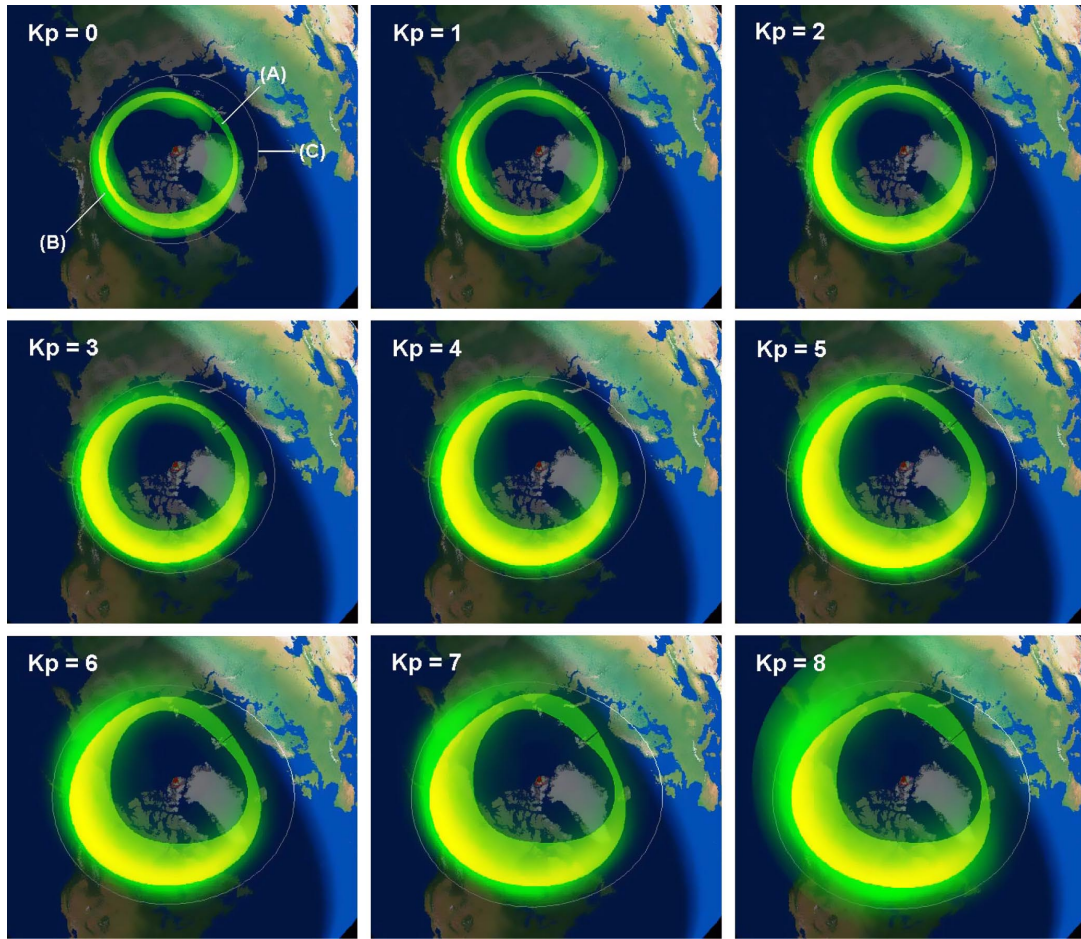


ABBILDUNG 4.2: Dargestellt ist das Holzworth-Modell (grün) und das Zhang-Paxton-Modell (diffus grün) für verschiedene Kp-Indizes am 24.12.2009 um 08:50 UT. Der Bereich der stärksten Überlappung beider Modelle erscheint gelblich. Zu erkennen ist die zunehmende Ovalausdehnung mit steigendem Kp-Index. Zudem wird klar, dass das ZP-Modell ein größeres Oval vorhersagt als das Holzworth-Modell. Dies gilt insbesondere für hohe Aktivitäten. Aus *Sigernes et al.* [2011].

Abbildung 4.2 zeigt das Oval nach *Holzworth et al.* [1975] und nach *Zhang und Paxton* [2008] für verschiedene Kp-Indizes mit der in *Sigernes et al.* [2011] beschriebenen Trans-

formation zu geografischen Koordinaten. Es ist zu erkennen, dass das Oval nach dem ZP-Modell größer ist als jenes aus dem Holzworth-Modell. *Sigernes et al.* [2011] untersucht, inwieweit beide Modelle miteinander übereinstimmen. Dabei wird klar, dass mit steigendem Kp-Index die Übereinstimmung abnimmt. Es sei erwähnt, dass beide Modelle für große magnetische Aktivitäten ungenauer sind als für geringe, da hohe Aktivität deutlich seltener auftritt und somit die Datenlage in diesen Fällen eingeschränkt ist.

4.1.2 Berechnung des Polarlichtovals

Mittels der aus den Modellen gewonnenen geografischen Position der äquaturnahen Grenze kann das Polarlichtoval für jeden beliebigen Zeitpunkt und beliebige Kp-Indizes berechnet werden, wobei auch eine Annahme über die Position des CGM-Pols getroffen werden muss. Im Weiteren wird lediglich die äquaturnahe Grenze des Ovals verwendet, da es für Beobachter in mittleren Breiten wahrscheinlicher ist, diese Grenze zu sehen. Für jede Beobachtung wird nun anhand des Standortes und der Uhrzeit das Oval berechnet.

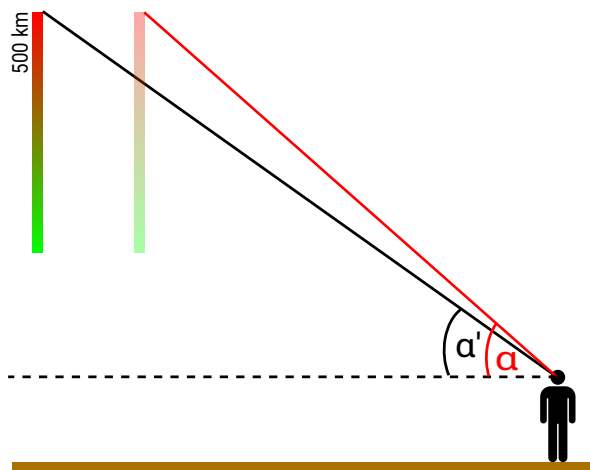


ABBILDUNG 4.3: Anhand des Modells wird eine theoretische Höhe α' berechnet, unter der ein Beobachter an einem gegebenen Standort zu einer bestimmten Zeit das Polarlicht laut Modell hätte sehen müssen. Dazu wird das obere Ende der äquaturnahen Grenze verwendet. Die theoretische Höhe wird mit der Höhe α aus den Berichten verglichen.

Anschließend wird ermittelt, unter welchem Winkel α' ein Beobachter das obere Ende ($h = 500$ km) der äquaturnahen Grenze hätte sehen müssen. Dieser Wert wird mit der wahren angegebenen Höhe α , also den Messwerten, verglichen (siehe Abbildung 4.3). Liegt die ermittelte Position der äquaturnahen Grenze südlicher als der Beobachtungsstandort (auf der nördlichen Hemisphäre), wird angenommen, dass die theoretische Höhe bei $\alpha' = 90^\circ$ liegt, also nach den Modellen das Polarlicht im Zenit hätte wahrgenommen werden können. Aus den Modellen kann nun der Punkt der äquaturnahen Grenze des Polarlichtovals berechnet werden, der die gleiche magnetische Lokalzeit wie der Beobachter aufweist. Es wird also nur ein einziger Punkt des Ovals berechnet, was zu einer drastischen

Minimierung der Rechenzeit führt. Die magnetische Lokalzeit (MLT) muss zunächst unter Berücksichtigung der geografischen Position des CGM-Pols, der Position des Beobachters und Lokalzeit der Beobachtung berechnet werden. Dazu wird nach Gleichung

4.16 der Beobachtungsstandort in kartesische Koordinaten umgerechnet, wobei sich der Vektor $\vec{X} = (x_B, y_B, z_B)$ ergibt. Da diesmal die Umrechnung von geografischen in CGM-Koordinaten erforderlich ist, muss \vec{X} mit der inversen Drehmatrix R^{-1} multipliziert werden. Analog zu Gleichung 4.19 ergibt sich dann die korrigierte geomagnetische Breite und Länge des Beobachters, wobei letztere zum Berechnen der MLT erforderlich ist. Die MLT berechnet sich dann über:

$$\text{MLT} = \text{LT} + \frac{(\phi_0 + \phi_{mB} - \phi_B) \cdot 24}{360^\circ}. \quad (4.20)$$

Hier ist ϕ_0 die geografische Länge des CGM-Pols, ϕ_{mB} die magnetische Länge des Beobachters und ϕ_B die geografische Länge des Beobachters. Der zweite Summand in Gleichung 4.20 beschreibt den Zeitunterschied zwischen geografischem und CGM-System, welcher zur Lokalzeit LT des Beobachters addiert wird. Die hier erforderliche Position des CGM-Pols geht als freier Parameter in Form von geografischer Länge ϕ_0 in die Berechnung ein. Das heißt, dass sich für jede Iteration der Parameter auch die MLT des Beobachters ändert. Ist die Position des Ovals bei gleicher MLT schließlich bekannt, muss unter Einbezug des Beobachtungsstandortes, der Lokalzeit der Beobachtung und des Azimuts des Polarlichts die theoretische Höhe α' berechnet werden. Dazu wird zunächst über den Zusammenhang

$$d = \arccos[\sin(\vartheta_{\text{Oval}}) \sin(\vartheta_B) + \cos(\vartheta_{\text{Oval}}) \cos(\vartheta_B) \cos(\phi_B - \phi_{\text{Oval}})] \quad (4.21)$$

der Abstand zwischen Beobachter und äquatornaher Grenze berechnet. Dabei ist ϑ_{Oval} und ϕ_{Oval} die geografische Breite bzw. Länge des Punktes im Polarlichtoval und ϑ_B und ϕ_B beschreiben die Position des Beobachters. Diese zwei Punkte sind der kürzeste Abstand zwischen Oval und Beobachter (Orthodrome). Das heißt, dass ein Beobachter, der in magnetische Nordrichtung¹ schaut, diesen Punkt des Auroraovals sieht. Abbildung 4.4 macht die Beziehungen deutlich. Dort beschreibt Punkt 1 die Stelle der äquatornahen Grenze des Ovals, die der Beobachter in magnetische Nordrichtung sieht. Schaut ein Beobachter in eine andere Richtung (DIR) als Norden, so sieht er zum Beispiel Punkt 2.

¹Der magnetische Pol der Nordhalbkugel ist im physikalischen Sinne ein magnetischer Südpol. Dennoch wird hier und im weiteren Verlauf von "magnetischer Nordrichtung" gesprochen, um Verwechslungen in der Beobachtungsrichtung auszuschließen.

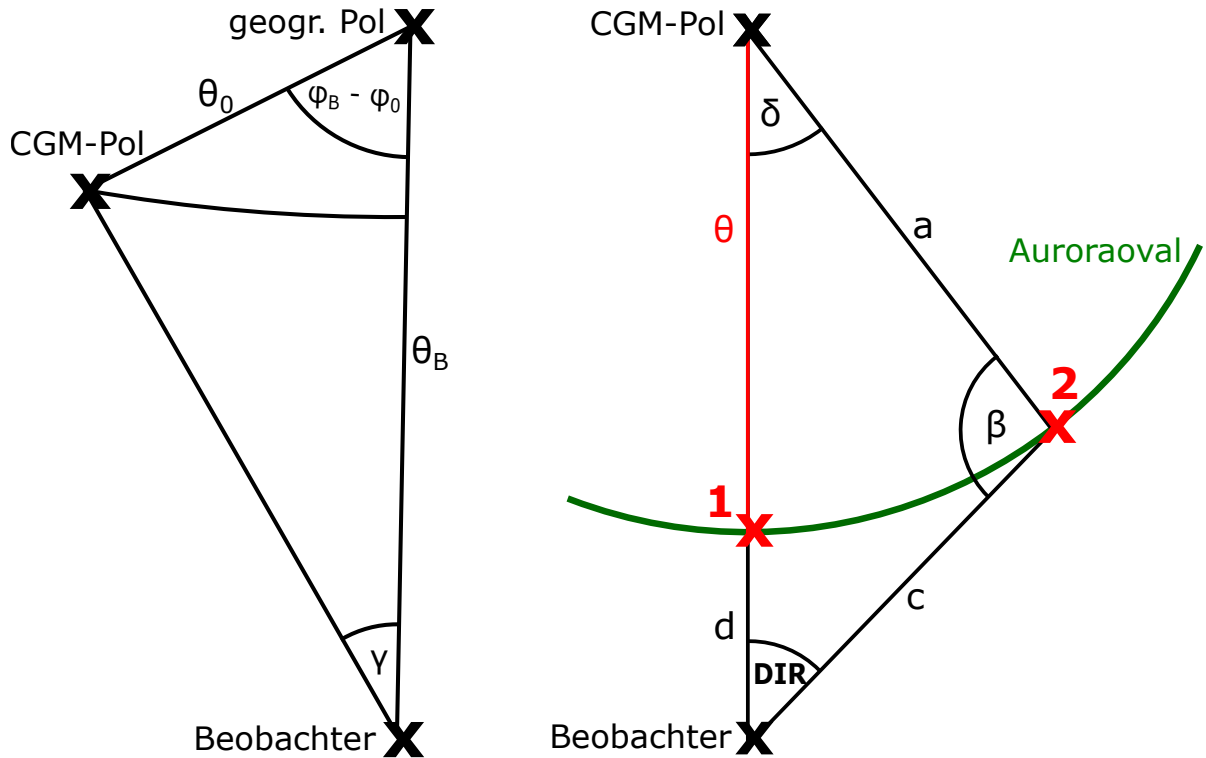


ABBILDUNG 4.4: Links: Zusammenhänge zum Umrechnen zwischen geografischen und korrigierten geomagnetischen Himmelsrichtungen. Der Unterschied in der geogr. Länge zwischen Beobachter und CGM-Pol wird mit $\phi_B - \phi_0$ beschrieben. Die Kobreite des CGM-Pols bzw. des Beobachters ist mit θ_0 und θ_B bezeichnet. Der Winkel γ ist gesucht. Rechts: Zu erkennen ist in grün die äquaturnahe Grenze des Ovals. Zudem ist ein Beobachtungsstandort sowie der CGM-Pol eingezeichnet. Vereinfacht wird das Oval hier als Kreis dargestellt, wobei θ die korrigierte geomagnetische Kobreite ist. Schaut ein Beobachter in magnetische Nordrichtung, so sieht er Punkt 1 des Ovals. Dieser Punkt hat die gleiche MLT wie der Beobachter selbst. Schaut der Beobachter hingegen in eine andere Richtung (DIR), so kann er zum Beispiel den Punkt 2 des Ovals sehen, welcher weiter von ihm entfernt ist als Punkt 1. Die Strecke d ist somit der kürzeste Abstand zwischen Beobachter und Oval.

Aus dem Abstand d kann unmittelbar die theoretische Höhe α' berechnet werden. Dies geschieht über die Formel

$$\alpha' = \arctan \left(\frac{\cos(d) - \frac{R_E}{R_E + h}}{\sin(d)} \right). \quad (4.22)$$

Dabei ist R_E der mittlere Erdradius und h die absolute Höhe der oberen Grenze des Polarlichts ($h = 500$ km). Für Beobachtungen in magnetischer Nordrichtung kann somit sofort die theoretische Höhe der Aurora berechnet werden. Fand die Beobachtung allerdings in einer anderen Himmelsrichtung, gegeben durch den Azimut des Polarlichts, statt, so ist die Strecke c in Abbildung 4.4 zu bestimmen. Außerdem sind die Angaben der Himmelsrichtung in Berichten auf das geografische System ausgerichtet. Es ist also zusätzlich

eine Umrechnung der geografischen Himmelsrichtung in die magnetische Himmelsrichtung (DIR) notwendig. Dazu ist wieder Kenntnis über die Lage des CGM-Pols notwendig, was innerhalb des Programms einen freien Parameter darstellt. Die Umrechnung der Himmelsrichtung in den beiden Systemen erfolgt über geometrische Zusammenhänge des in Abbildung 4.4 links dargestellten Dreiecks, bestehend aus geografischem Pol, CGM-Pol und dem Beobachter. Hier handelt es sich eigentlich um ein sphärisches Dreieck, welches vereinfacht dargestellt wurde. Gesucht ist der Winkel γ , der den Unterschied zwischen der Himmelsrichtung im geografischen und CGM-System angibt. Über Winkelbeziehungen in sphärischen Dreiecken ergibt sich

$$\gamma = \arcsin \left[\frac{\sin \Theta_0 \cdot \sin(\phi_B - \phi_0)}{\sin[\arccos(\cos \Theta_B \cdot \cos \Theta_0 + \sin \Theta_B \cdot \sin \Theta_0 \cdot \cos(\phi_B - \phi_0))]} \right]. \quad (4.23)$$

Hier sind Θ_0 und Θ_B die geografische Kobreite des CGM-Pols und des Beobachters. Der Unterschied in der geografischen Länge zwischen Beobachter und CGM-Pol wird mit $\phi_B - \phi_0$ beschrieben. Addition von γ mit der gegebenen Himmelsrichtung in geografischen Koordinaten liefert die magnetische Himmelsrichtung DIR. Sobald DIR bekannt ist, kann Strecke c ausgerechnet werden. Um dies zu ermöglichen, muss das Auroraoval, wie in Abbildung 4.4 rechts, lokal als kreisförmig angenommen werden (es gilt also $a = \Theta$). Anderenfalls wäre die MLT der Stelle des Ovals erforderlich, an der der Beobachter das Polarlicht sieht. Es ist allerdings ausgeschlossen mit den gegebenen Informationen diese MLT zu ermitteln, da in dem unregelmäßigen Dreieck, bestehend aus Beobachterposition, CGM-Pol und Punkt 2 in Abbildung 4.4 rechts nur der Winkel DIR sowie die angrenzende Strecke $\Theta + d$ bekannt sind. Es ist dennoch sinnvoll, die oben genannten Modelle des Polarlichtovals zu verwenden, da diese die korrekte Kobreite in magnetischer Nordrichtung ergeben, welche durch die komplexe Form des Auroraovals abhängig von der Lokalzeit ist. Bei der Approximation des gesamten Ovals mit einem Kreis würde diese Abhängigkeit wegfallen. Der Abstand c kann über folgende Formeln berechnet werden. Zunächst wird der Sinussatz genutzt, um Winkel β zu berechnen. Es gilt:

$$\beta = \pi - \arcsin \left[\frac{\sin(\Theta + d) \sin(DIR)}{\sin(\Theta)} \right]. \quad (4.24)$$

Anschließend kann c über die Neperschen Gleichungen berechnet werden.

$$c = 2 \arctan \left[\frac{\tan \left(\frac{\Theta+d}{2} \right) \cos \left(\frac{DIR+\beta}{2} \right)}{\cos \left(\frac{DIR-\beta}{2} \right)} \right]. \quad (4.25)$$

Mit Strecke c kann über

$$\alpha' = \arctan \left(\frac{\cos(c) - \frac{R_E}{R_E+h}}{\sin(c)} \right) \quad (4.26)$$

die theoretische Höhe α' unter Einbezug der Himmelsrichtung berechnet werden. Mit diesen Informationen ist es möglich, die Differenz zwischen theoretischer Höhe und wahrer Höhe ($\alpha - \alpha'$) zu bestimmen.

Die aus den Beobachtungen stammende wahre Höhe ist Messunsicherheiten unterworfen. Es wird angenommen, dass die Fehler normalverteilt sind, mit Mittelwert α' und Varianz σ^2 . Wie in *Campbell* [2004] beschrieben, kann die multivariate Verteilung aller Beobachtungen als Produkt der n einzelnen Beobachtungen angenommen werden. Es gilt folglich für das Datenmodell:

$$\begin{aligned} f(\alpha_1, \dots, \alpha_n | \sigma^2, \alpha') &= \prod_{i=1}^n (2\pi\sigma^2)^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\alpha_i - \alpha'_i)^2 \right] \\ &= (2\pi\sigma^2)^{-\frac{n}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha'_i)^2 \right]. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Als nächstes geht es darum, Annahmen für das a-priori-Ovalmodell zu treffen, welches die physikalischen Parameter ω enthält. Diese freien Parameter sind die geografische Breite und Länge des CGM-Pols sowie der Kp-Index. Da keine weiteren Informationen über diese Parameter bekannt sind und davon ausgegangen wird, dass der Pol bei allen Positionen als gleichwahrscheinlich anzusehen ist und auch alle Kp-Werte gleichwahrscheinlich sind, wird eine a-priori-Verteilung in Form einer stetigen Gleichverteilung gewählt, die auf ein Intervall eingeschränkt wird. Für das a-priori-Modell werden Startwerte von $-\pi/2$ für die geografische Länge des CGM-Pols, $\sin(80^\circ)$ für die Breite des CGM-Pols² und 6 für den Kp-Index vorgegeben, die als Mittelwerte der Gleichverteilungen in die Berechnung eingehen. Zudem gibt es Vorwissen über das mögliche Intervall dieser Parameter, welches eingeschränkt werden kann. So kann die Länge des Pols Werte zwischen $-\pi$ und π annehmen. Die Breite wurde auf das Intervall zwischen $\sin(50^\circ)$ und $\sin(90^\circ)$ beschränkt, wobei der untere Wert durch die in Abschnitt 2.1.2 behandelten paläomagnetischen Modelle zustande kommt. Diese suggerieren, dass die geografische Breite des Geomagnetpols in den letzten 10 000 Jahren nie geringer war als $\approx 76^\circ$. Um das Intervall jedoch nicht zu sehr einzuschränken und weitere Freiheiten zuzulassen, wurde eine Breite von 50° gewählt. Der Kp-Index kann, wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, Werte zwischen 0 und 9+ annehmen. Zu guter Letzt gehen in das a-priori-Parametermodell Annahmen über die

²Im Falle der geografischen Breite ist es notwendig, den Sinus der Breite zu verwenden, da nur so eine Gleichverteilung gewährleistet werden kann.

Fehler der physikalischen und statistischen Parameter ein. Für die Standardabweichung σ der beobachteten Polarlichthöhe α wurde ein Wert von 10° angenommen. Auch den drei physikalischen Parametern werden Standardabweichungen zugeordnet, die im Folgenden mit in die Schrittwerten der Markov-Ketten eingehen, weshalb diese so gewählt werden, dass der Parameterraum effizient abgelaufen wird. Dabei wird für die geografische Länge im Bogenmaß ein Wert von 0,1 angenommen. Für den Sinus der Breite beträgt die Standardabweichung 0,08 und für den Kp-Index 0,5.

Bei der Bayes-Inferenz ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsdichte über den gesamten Parameterraum. Für jede Parameterkonfiguration wird die Likelihood berechnet, dass das gegebene Modell die beobachteten Daten erzeugt hat. Ist die Abweichung groß, so bekommt das Modell mit dieser spezifischen Parameterkonfiguration eine geringe Likelihood. Um die Lösung innerhalb des Parameterraums zu finden, wird eine Markov-Ketten-Monte-Carlo-Simulation (MCMC) angewendet, die durch Nutzen des Metropolis-Hastings-Formalismus den Parameterraum sehr effizient nach dem globalen Maximum absucht [Robert, 2016]. Dazu wird eine Markov-Kette erzeugt, die gegen die a-posteriori-Verteilung $f(M|D)$ konvergiert. Daraus können Zufallszahlen M^i gewonnen werden, die auch vom aktuellen Schritt der Markov-Kette abhängen, wobei i den Iterationsindex beschreibt. Diese Zufallszahlen haben ihren Ursprung in einer Verteilung mit der Dichte $g(M|M^i)$. Als nächstes wird eine neue Zufallszahl M' aus der Verteilung $g(M|M^i)$ vorgeschlagen, weshalb diese als "Vorschlagswert" bezeichnet wird. Diese neue Zufallszahl wird mit der Wahrscheinlichkeit

$$\rho = \min \left\{ 1, \frac{f(M'|D)}{f(M^i|D)} \cdot \frac{g(M^i|M')}{g(M'|M^i)} \right\} \quad (4.28)$$

akzeptiert. In dem Fall wird $M^{(i+1)}$ zu M' . Anderenfalls ist $M^{i+1} = M^i$. Ausgehend von einem Startwert wird also ein neuer Wert in der Nähe vorgeschlagen und das Produkt aus Likelihood und a-priori-Verteilung berechnet. Hat der neue Wert eine höhere Wahrscheinlichkeit, so wird dieser zumeist angenommen. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wird allerdings der schlechtere Wert beibehalten. Dadurch wird sichergestellt, dass die Markov-Kette nicht in einem lokalen Maximum hängen bleibt. Metropolis konnte nachweisen, dass der Algorithmus eine Zeit an einer Stelle des Parameterraums verbringt, die die Wahrscheinlichkeit dieser Parameterkonfiguration widerspiegelt [Dormann, 2019]. Aus der gegen die a-posteriori-Verteilung konvergierte Markov-Kette können Zufallszahlen generiert werden, die zur Monte-Carlo-Schätzung verschiedener Parameter der a-posteriori-Verteilung genutzt werden können [Held, 2008]. Durch Monte-Carlo-Integration wird die tatsächliche Integration der Verteilungen umgangen, da aus den gewonnenen Zufallszahlen M^i zum Beispiel direkt der Erwartungswert berechnet werden kann.

Sollen die a-posteriori-Verteilungen der einzelnen Parameter dargestellt werden (siehe Abbildung 4.6), so geschieht dies über Marginalisierung über die anderen Parameter. Das Programm zur Berechnung der Parameter basiert auf den Ausarbeitungen von *Arlt et al.* [2013], wobei der Code entsprechend angepasst wurde, um anhand der bodengebundenen Beobachtungen das Polarlichtoval zu rekonstruieren und so die gesuchten Parameter zu bestimmen.

Die Methode kann, durch Einschränkung auf gewisse Parameter, vereinfacht werden. Dies könnte insbesondere bei einer schlechten Datenlage erforderlich sein. So ist es zum einen möglich den Kp-Index auf einen festen Wert von 9+ zu setzen, da bekannt ist, dass die Methode nur auf starke Geomagnetstürme angewendet wird, was diese Annahme rechtfertigt. In diesem Fall wird lediglich die Position des CGM-Pols bestimmt. Zum anderen kann auch die Position des Pols festgehalten werden, um nur den Kp-Index zu bestimmen. Seit 1900 steht die Position des CGM-Pols durch das IGRF zur Verfügung. Zwischen 1590 und 1900 sollte eine Orientierung am *gufm1*-Modell erfolgen, wobei hier nur der Geomagnetpol bekannt ist, was im Falle historischer Stürme aber ausreichend genau ist. Anderenfalls kann eine Umrechnung zum CGM-Pol erfolgen. Vor 1590 ist eine Beschränkung auf die historischen Magnetfeldmodelle von Nöten, wobei als Geomagnetpol die Positionen aus den verschiedenen Modellen gemittelt werden können. Auch hier ist grundsätzlich eine Berechnung des CGM-Pols möglich. Es ist jedoch zu vermuten, dass innerhalb der räumlichen Auflösung der Modelle der Positionsunterschied zwischen Geomagnet- und CGM-Pol vernachlässigbar ist.

Zum Durchführen der hier erläuterten Methode sind einige Anforderungen an die Berichte und Sichtungen nötig. So ist es erforderlich den Beobachtungsstandort sowie die Zeit der Polarlichtsichtung zu kennen. Weiterhin muss aus den Berichten hervorgehen, in welcher Himmelsrichtung und in welcher Höhe α über dem Horizont der Beobachter das Polarlicht gesehen hat. Im Falle der Rekonstruktion zweier Geomagnetstürme in jüngerer Vergangenheit (siehe Abschnitt 4.2), wurden Fotos der Polarlichter genutzt, um anhand der abgebildeten Hintergrundsterne die erforderlichen Daten zu ermitteln.

4.1.3 Grenzen der Methode

In der hier entwickelten Methode ist es wichtig, dass anhand der Ovalmodelle eine theoretische Beobachtungshöhe des Polarlichts für jede Beobachtung ermittelt werden kann. In einigen Fällen, in denen der Beobachter in eine stark vom magnetischen Norden abweichende Himmelsrichtung geschaut hat, ist dies jedoch nicht möglich, da der Beobachter laut dem Modell an dieser Stelle kein Polarlicht hätte sehen dürfen. Da das ZP-Modell ein größeres Oval beschreibt als das Holzworth-Modell, fällt dieser Effekt hier deutlich

weniger ins Gewicht. Dennoch könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass beide Modelle die Ausdehnung des Polarlichtovals für große K_p -Indizes unterschätzen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten diese Effekte zu umgehen. Eine Möglichkeit wäre, die Himmelsrichtung nicht zu betrachten und stets anzunehmen, dass die Beobachtung in magnetische Nordrichtung erfolgte. Diese Variante führt für alle Beobachtungen zu einer Lösung, ignoriert jedoch bekannte Informationen. Weiterhin könnten die Beobachtungen, für die es laut Modell keine Lösung gibt, vernachlässigt werden, was allerdings die Datenmenge einschränkt. Ein Kompromiss ist es, die Richtung für alle Beobachtungen, bei denen die Modelle eine Lösung liefern, mit einzubeziehen und lediglich in den übrigen Fällen als Beobachtungsrichtung den magnetischen Norden anzunehmen.

Zu guter Letzt ist auch die Lösung mittels eines gänzlich anderen Ansatzes möglich. Hierbei wird nicht die theoretische Polarlichthöhe mit der wahren Höhe verglichen, sondern die Position des Polarlichts anhand der Beobachtungsdaten in 3D kartesischen Koordinaten berechnet. Dieser Punkt kann dann mit dem nächstgelegenen Punkt des Ovals aus den Modellen verglichen werden. Hierzu ist es zunächst notwendig, aus gegebener Höhe und dem aus den Berichten bekannten Azimut, die Position des Polarlichts zu bestimmen. Wurde das Polarlicht im Zenit beobachtet, so stimmt die Position des Beobachters mit der des Polarlichts überein. Für andere Höhen α kann der Abstand g zwischen Beobachter und Polarlicht mittels

$$g = 90^\circ - \alpha - \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + h} \cdot \cos(\alpha)\right) \quad (4.29)$$

berechnet werden. Dabei ist h wie zuvor die absolute Höhe des Polarlichts über dem Meeresspiegel ($h = 500$ km) und R_E der Erdradius. Die in den Berichten angegebene Höhe unter der die Aurora beobachtet wurde entspricht α . Die Position der Polarlichts weicht unter diesen Annahmen also um den Wert g gegenüber der Beobachterposition in Beobachtungsrichtung (Azimut) ab. Diese muss noch über

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= g \cdot \sin(\overline{az}), \\ \Delta\vartheta &= g \cdot \cos(\overline{az}) \end{aligned} \quad (4.30)$$

mit einbezogen werden, wobei $\Delta\phi$ und $\Delta\vartheta$ die Differenz zwischen Beobachter und Polarlichtposition in Länge bzw. Breite beschreibt. \overline{az} gibt den mittleren Azimut des Polarlichts an. Die Position der Aurora berechnet sich über Addition der Länge und Breite des Beobachters mit $\Delta\phi$ und $\Delta\vartheta$. Anschließend erfolgt eine Umrechnung in 3D kartesische Koordinaten. Dazu wird in Matlab R2018a die Routine `ell2xyz` aus der “Geodetic Toolbox Version 2.99.0.0” von Mike Craymer genutzt (<https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15285-geodetic-toolbox>), wobei als Referenzsystem das “World Geode-

tic System 1984” oder kurz “WGS84” genutzt wurde, welches zum Beispiel die Abplattung der Erde mit einbezieht [Department of Defense, 1991]. Die sich ergebende Position der Aurora kann direkt mit dem Vektor (x_g, y_g, z_g) der nächstgelegenen Ovalposition aus den Modellen verglichen werden. Durch dieses Verfahren kann für jede Beobachtung eine Lösung erzeugt werden, da ein Schnittpunkt mit dem eigentlichen Oval nicht notwendig ist. Auch hier können beide zuvor genannten Ovalmodelle genutzt werden.

Insgesamt stehen also verschiedene Methoden sowie zwei Modelle zur Verfügung, um das Polarlichtoval zu rekonstruieren. Dabei kann im Wesentlichen einmal die aus den Modellen berechnete theoretische Polarlichthöhe mit der in den Berichten gegebenen Höhe verglichen werden (Ansatz A), oder die Position des Polarlichts wird aus den Informationen der Berichte berechnet, was zum anschließenden Vergleich mit der nächstgelegenen Position der Aurora aus den Modellen herangezogen werden kann (Ansatz B). Die verschiedenen Ansätze und Methoden sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

TABELLE 4.1: Übersicht über die verschiedenen Methoden und Modelle. Die grau hinterlegten Methoden nutzen das Modell nach *Zhang und Paxton* [2008], wohingegen in den anderen Fällen das Modell nach *Holzworth et al.* [1975] genutzt wird. Zudem stehen die zwei oben erklärten Ansätze zur Verfügung. Die dritte Spalte beschreibt, ob die in den Berichten/Fotografien gegebene Richtung mit einbezogen wurde.

Nr.	Ansatz	Richtung	Beschreibung
1	A	nein	Alle Beobachtungen in magn. Nordrichtung
2	A	ja	Falls keine Lösung in geg. Richtung → Beob. in magn. Nordrichtung
3	A	ja	Ignorieren der Beobachtungen ohne Lösung
4	B	ja	Berechnung Auroraposition aus Berichten und Vergleich mit Modellen
5	A	nein	Alle Beobachtungen in magn. Nordrichtung
6	A	ja	Falls keine Lösung in geg. Richtung → Beob. in magn. Nordrichtung
7	A	ja	Ignorieren der Beobachtungen ohne Lösung
8	B	ja	Berechnung Auroraposition aus Berichten und Vergleich mit Modellen

4.1.4 Testen der Methode an synthetischen Beobachtungen

Um die Methoden zu testen, wurden zunächst synthetische Beobachtungen erstellt, für die der Kp-Index sowie die Position des CGM-Pols bekannt sind. Dazu wurden in einem vordefinierten geografischen Breitenbereich zufällige Beobachtungsstandorte generiert. Jedem Standort wurde außerdem zufällig eine Uhrzeit sowie eine Richtung für die Polarlichtbeobachtung zugewiesen. Im Falle der Uhrzeit war das Intervall auf 21:00 Uhr bis 03:00 Uhr Lokalzeit beschränkt, wohingegen Richtungen zwischen -45° und 45° gegenüber der magnetischen Nordrichtung zulässig waren. Anschließend wurden die oben genannten Modelle genutzt, um jeder Beobachtung eine Höhe für das Polarlicht zuzu-

ordnen, die der in den Berichten gegebenen Polarlichthöhe entspricht. Der Kp-Index und die Position des Pols wurden dabei vorgegeben. Im folgenden Beispiel wurden 40 Beobachtungen zwischen 40° und 60° geografischer Breite erstellt, wobei die Verteilung in der geografischen Länge ungleichmäßig ist, um die Beobachtungsverteilung wahrer Stürme nachzuahmen. Die entsprechenden Polarlichthöhen wurden mit dem Holzworth- bzw. dem ZP-Modell erstellt.

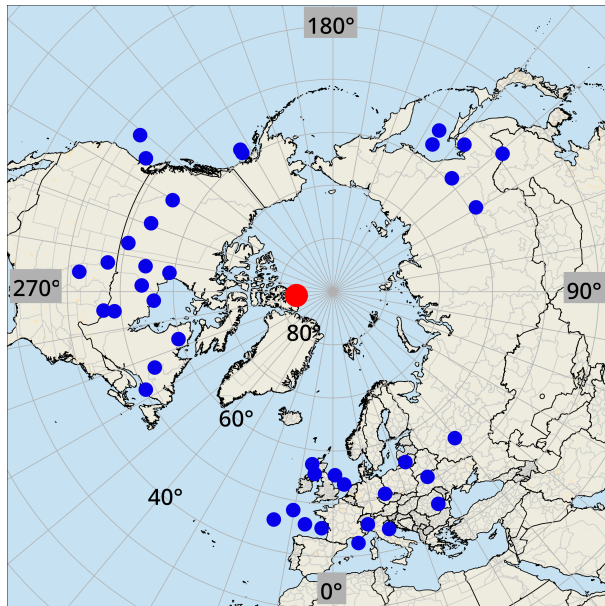


ABBILDUNG 4.5: Geografische Verteilung der 40 erzeugten Beobachtungen (blau) sowie die Position des angenommenen CGM-Pols (rot).

Der Kp-Index für diese Beobachtungen liegt bei 6 und dem CGM-Pol wurde eine geografische Position von $83,1^\circ$ N und $84,0^\circ$ W zugeordnet. Als Ergebnis sollten die verschiedenen Methoden wieder die vorgegebenen Parameter liefern.

Abbildung 4.5 zeigt die geografischen Positionen der erzeugten Beobachtungen (blau) sowie den vorgegebenen CGM-Pol (rot). Die ermittelten Parameter stimmen mit den vorgegebenen Werten überein (siehe Tabelle 4.2). Die Ergebnisse werden am Beispiel von Methode 2 genauer diskutiert. Für den CGM-Pol ergab sich mit Methode 2 eine geografische Position von $(83,1 \pm 0,1)^\circ$ N und $(84,1 \pm 3,5)^\circ$ W. Der ermittelte Kp-Index liegt bei $6,0 \pm 0,4$. Zu erkennen ist, dass der Kp-Index als Dezi-

malzahl ausgegeben wird. Aber auch die Skala des Kp-Index kann durch Dezimalzahlen repräsentiert werden. Das Minus hinter dem Kp-Wert ist dabei gleichbedeutend mit einer Reduktion der vorstehenden Zahl um 0,33 (z.B. $6- = 5,67$). Das Plus hingegen beschreibt eine Erhöhung um 0,33 (z.B. $6+ = 6,33$). Abbildung 4.6 zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung aller drei Parameter nach Methode 2. Dabei ist jeweils ein deutlicher Peak zu erkennen.

Um weitere Ungenauigkeiten in den Beobachtungen zu simulieren, wurden die berechneten Höhen der synthetischen Sichtungen zufällig in einem 10° -Intervall um den vorher bestimmten Wert variiert. Es konnten erneut Ergebnisse erzielt werden, die sich mit den Vorgaben decken (Methode 2: CGM-Pol bei $(83,2 \pm 0,1)^\circ$ N und $(83,0 \pm 3,7)^\circ$ W, $K_p = 6,1 \pm 0,5$).

Im nächsten Schritt wurden die ostasiatischen Beobachtungen für die Berechnung vernachlässigt, da auch bei realen Stürmen Sichtungen in Ostasien oft fehlen. Es blieben

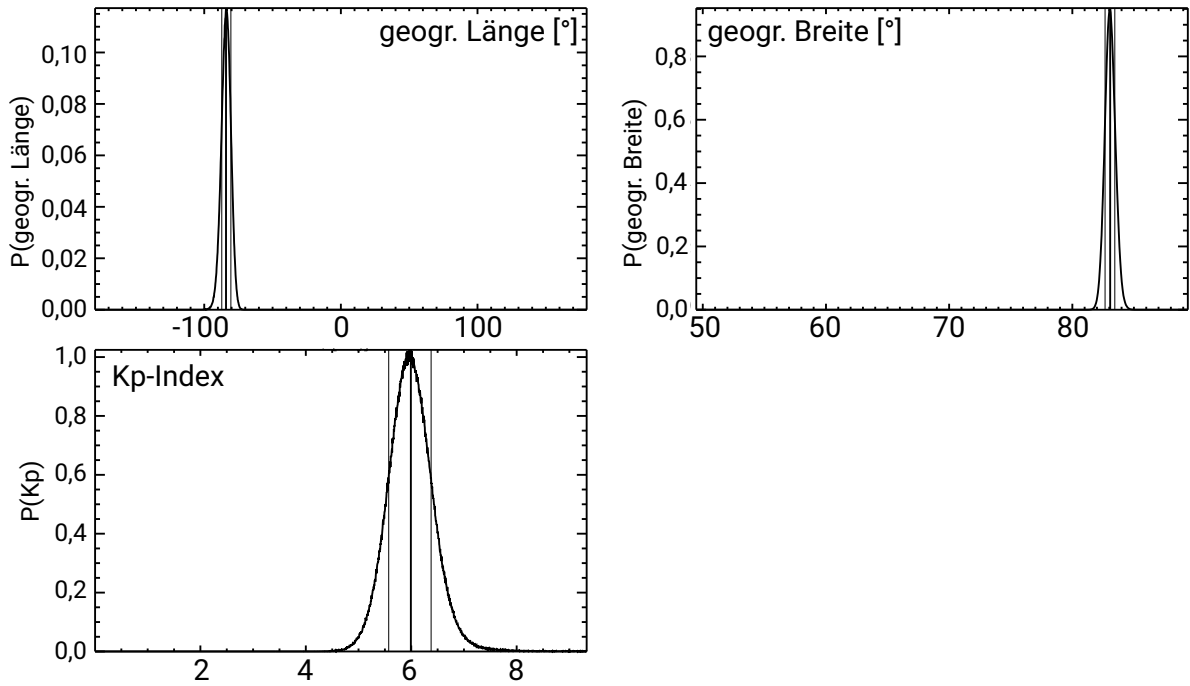


ABBILDUNG 4.6: Ergebnisse von Methode 2 für die geografische Länge und Breite des CGM-Pols sowie den Kp-Index. Dabei sind klare Peaks in der Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Parameter erkennbar. Die vorgegebenen Werte konnten reproduziert werden.

34 synthetisch erzeugte Beobachtungen in Nordamerika und Europa übrig. Damit sollte überprüft werden, ob dies Effekte auf das Ergebnis hat. Die ermittelte Position des CGM-Pols unter Verwendung von Methode 2 liegt bei $(83,1 \pm 0,1)^\circ$ N und $(84,2 \pm 3,6)^\circ$ W. Der berechnete Kp-Index beträgt $6,0 \pm 0,5$. Die Ergebnisse ändern sich nicht signifikant und es können nach wie vor die vorgegebenen Parameter ermittelt werden. Da die synthetischen Beobachtungen unter Zuhilfenahme der Modelle erzeugt wurden, wird die Ovalausdehnung in diesen Fällen nicht unterschätzt, weshalb auch für hohe Kp-Indizes konsistente Ergebnisse erzielt wurden. Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden unter Benutzung des Holzworth- sowie des ZP-Modells sind in Tabelle 4.2 zu sehen. Die Tabelle ist analog zu Tabelle 4.1 aufgebaut. Wie erwähnt wurden alle Berechnungen mit einer zusätzlichen Variation der Polarlichthöhe erneut durchgeführt, um zu prüfen, ob auch bei größeren Abweichungen in der gegebenen Höhe konsistente Ergebnisse erzielt werden können. Eine Übersicht über diese Ergebnisse findet sich in Anhang D in Tabelle D.2.

Anhand von Tabelle 4.2 wird klar, dass für alle Methoden die vorgegebenen Werte wieder ermittelt werden konnten. Es ist auffällig, dass die geografische Länge des CGM-Pols größere Fehlerbereiche aufweist als dies für die Breite der Fall ist. Dieses Verhalten zeigt sich auch im späteren Verlauf beim Untersuchen moderner und historischer Geomagnetstür-

me. Trotz des größeren Fehlers deckt sich der errechnete Wert mit den Vorgaben. Es wird weiterhin deutlich, dass die Methoden mit Ansatz A und unter Einbezug der gegebenen Beobachtungsrichtung (Methode 2,3,6 und 7) insbesondere für die geografische Länge des CGM-Pols Ergebnisse liefern, die näher an der vorgegebenen Position liegen.

Um die Genauigkeit der Rekonstruktion der einzelnen Methoden einordnen zu können, wurde die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSD) berechnet. Dabei wird geprüft, wie gut die Beobachtungsdaten mit dem rekonstruierten Oval übereinstimmen. Ein geringerer RMSD bedeutet, dass das rekonstruierte Oval besser zu den Daten passt. Der RMSD berechnet sich nach

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha'_i)^2}, \quad (4.31)$$

wobei α'_i die theoretische Polarlichthöhe angibt, die unter Benutzung der ermittelten Ovalparameter (Länge und Breite des CGM-Pols sowie Kp-Index) berechnet wurde. Die in den Berichten angegebene Höhe, unter der das Polarlicht über dem Horizont beobachtet wurde, wird durch α_i ausgedrückt, wobei n die Anzahl der Beobachtungen ist. Die Methoden 4 und 8 stützen sich auf einen anderen Ansatz der Rekonstruktion. Daher ergeben sich hier RMSD-Werte, die nicht mit den anderen Methoden, sondern nur untereinander vergleichbar sind. Die RMSD-Werte zeigen erneut, dass die Berechnungen unter Einbezug der Beobachtungsrichtung bessere Ergebnisse liefern. Zudem ergeben sich für Methode 3 die geringsten RMSD-Werte. Hier werden Beobachtungen, die nach den Ovalmodellen keine Ergebnisse liefern, vernachlässigt, was über eine Einschränkung des Azimutintervalls geschieht. Im vorliegenden Fall der synthetischen Beobachtungen wurde das Azimutintervall auf -35° bis 35° eingeschränkt. Dies resultierte im Wegfallen von sechs Beobachtungen. Das mit Methode 3 rekonstruierte Oval spiegelt also die Beobachtungsdaten am besten wider. Methoden 1 und 5, bei denen die Beobachtungsrichtung nicht mit einbezogen wird, liefern Ergebnisse, die erst innerhalb von 2σ mit den Vorgaben übereinstimmen. Die Abweichung zeigen sich auch in einem höheren RMSD-Wert. Nach Möglichkeit sollten demnach die Beobachtungsrichtungen genutzt werden.

Nach vernachlässigen der ostasiatischen Sichtungen zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei die RMSD-Werte insgesamt etwas höher ausfallen. Demnach verschlechtert sich die Rekonstruktion bei einer ungleichmäßigeren globalen Beobachtungsverteilung, wenn auch nur minimal. Für die Praxis impliziert dies, dass nach Möglichkeit Polarlichtsichtungen mit einer guten globalen Abdeckung gesucht werden sollten.

Analog zum Holzworth-Modell wurde auch das Zhang-Paxton-Modell anhand synthetischer Beobachtungen getestet. Dabei zeigt sich, dass wie zuvor die vorgegebenen Para-

TABELLE 4.2: Ergebnisse der Berechnungen anhand synthetischer Beobachtungen. Weiß hinterlegt sind die Berechnungen mittels des Holzworth-Modells, wobei die grau hinterlegten Zeilen die Ergebnisse unter Verwendung des ZP-Modells anzeigen. Die obere Tabelle zeigt die Resultate aller 40 generierten Beobachtungen. Die untere Tabelle beinhaltet die erzielten Ergebnisse beim vernachlässigen der ostasiatischen Sichtungen. Die vorgegebene Position des CGM-Pols liegt bei $83,1^\circ$ N und $84,0^\circ$ W, wobei ein Kp-Index von 6 gewählt wurde.

Nr.	Ansatz	geogr. Breite [°]	geogr. Länge [°]	Kp-Index	RMSD
1	A	$82,8 \pm 0,1$	$-88,6 \pm 3,8$	$5,3 \pm 0,5$	4,21
2	A	$83,1 \pm 0,1$	$-84,1 \pm 3,5$	$6,0 \pm 0,4$	2,58
3	A	$83,1 \pm 0,1$	$-84,2 \pm 4,0$	$6,0 \pm 0,5$	2,14
4	B	$83,6 \pm 0,1$	$-86,9 \pm 9,2$	$5,7 \pm 1,0$	$3,5 \cdot 10^5$
5	A	$82,9 \pm 0,1$	$-89,0 \pm 1,7$	$5,9 \pm 0,1$	4,64
6	A	$83,2 \pm 0,1$	$-85,1 \pm 2,2$	$5,9 \pm 0,1$	2,21
7	A	$83,0 \pm 0,1$	$-84,2 \pm 1,7$	$6,0 \pm 0,1$	0,73
8	B	$83,5 \pm 0,1$	$-86,7 \pm 9,1$	$5,9 \pm 0,3$	$2,7 \cdot 10^5$
Nr.	Ansatz	geogr. Breite [°]	geogr. Länge [°]	Kp-Index	RMSD
1	A	$82,9 \pm 0,1$	$-88,9 \pm 4,0$	$5,4 \pm 0,6$	4,26
2	A	$83,1 \pm 0,1$	$-84,2 \pm 3,6$	$6,0 \pm 0,5$	2,68
3	A	$83,1 \pm 0,1$	$-84,4 \pm 4,1$	$6,0 \pm 0,6$	2,17
4	B	$83,9 \pm 0,2$	$-91,9 \pm 13,8$	$6,2 \pm 1,4$	$3,6 \cdot 10^5$
5	A	$84,1 \pm 0,1$	$-92,5 \pm 5,0$	$6,4 \pm 0,3$	4,71
6	A	$83,1 \pm 0,1$	$-84,3 \pm 4,0$	$6,1 \pm 1,7$	2,98
7	A	$83,1 \pm 0,1$	$-84,4 \pm 4,1$	$6,0 \pm 1,9$	1,83
8	B	$83,9 \pm 0,2$	$-93,6 \pm 15,0$	$6,1 \pm 0,5$	$2,9 \cdot 10^5$

meter wieder ermittelt werden konnten. Allerdings stimmen die errechneten Werte meist erst innerhalb von 2σ mit den Vorgaben überein. Die RMSD-Werte liegen im gleichen Größenbereich wie für die Berechnungen unter Nutzung des Holzworth-Modells, wobei erneut Methode 7 (analog zu Methode 3 aus dem Holzworth-Modell) die besten Ergebnisse liefert. Allgemein liefern die Methoden mit Ansatz A bessere Ergebnisse als die Berechnungen mit Ansatz B. Da die synthetischen Beobachtungen mit dem jeweiligen Modell erzeugt wurden, kann hier keine Einschätzung erfolgen, welches Modell die Beobachtungsverteilung besser widerspiegelt. Dieser Vergleich ist erst im weiteren Verlauf anhand wahrer Beobachtungsverteilungen möglich.

Tabelle D.2 in Anhang D zeigt die Ergebnisse der Rechnungen nach zusätzlicher Variation der Polarlichthöhe innerhalb eines 10° -Intervalls. Es ist zu erkennen, dass keine signifikante Veränderung zu den in Tabelle 4.2 gezeigten Werten resultiert. Innerhalb der Fehler sind die Werte sowohl mit den Vorgaben als auch mit den Ergebnissen ohne die

Höhenvariation verträglich. Zudem sind die RMSD-Werte ebenfalls in der selben Größenordnung. Die entwickelten Methoden liefern also auch für größere Abweichungen der beobachteten Polarlichthöhe gute Ergebnisse, wobei sich keine signifikanten Unterschiede in den verschiedenen Methoden ergeben. Somit konnte in allen Fällen bestätigt werden, dass das entwickelte Verfahren für künstlich erstellte Beobachtungen sehr gute Ergebnisse liefert. Im nächsten Schritt werden moderne geomagnetische Stürme untersucht, für die die Parameter aus direkten Messungen bekannt sind. So kann das Verfahren weiter auf Konsistenz geprüft werden.

4.2 Rekonstruktion anhand moderner Beispiele

Um das entwickelte Verfahren zur Rekonstruktion des Auroraovals zu validieren, wurden zwei moderne Geomagnetstürme benutzt, für die die jeweilige Position des CGM-Pols sowie der Kp-Index bekannt sind. Ein Vergleich zwischen diesen Werten mit jenen aus der Rekonstruktion gibt Aufschluss darüber, ob mit dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren gute und verlässliche Ergebnisse auch für reale Stürme erzielt werden können. Als Datenbasis dienten hier insbesondere Amateuraufnahmen der Polarlichter am betreffenden Datum, wobei vor allem die in Abschnitt 3.1 vorgestellten Datenbanken genutzt wurden. Mit den aus den Fotografien ermittelten Daten kann eine Rekonstruktion des Polarlichtovals vorgenommen werden.

4.2.1 Der St. Patrick's Day-Sturm vom 17. März 2015

Am 15. März 2015 produzierte die aktive Region (AR) 12297 einen schnellen koronalen Massenauswurf (CME), der letztendlich zu einem G4 geomagnetischen Sturm führte, dem stärksten in Zyklus 24 [Wang *et al.*, 2016]. Am 17. (St. Patrick's Day) sowie 18. März 2015 trat starke Polarlichtaktivität über Europa und Nordamerika auf.

Wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, beträgt der maximale Kp-Index 8–, wobei das Tagesmittel unter Ausschluss des 0:00 Uhr bis 03:00 Uhr Intervalls bei $\overline{Kp} \approx 7-$ liegt. Der Geomagnetpol lag 2015 laut dem IGRF-12 bei 80,4° N und 72,6° W. Daraus lässt sich mittels des *apexpy 1.0.1* Codes die Lage des CGM-Pols bestimmen, wobei sich eine Position von 83,1° N und 84,6° W ergibt.

Insgesamt 235 Beobachtungen konnten für den St. Patrick's Day-Sturm gefunden werden. Für 186 Sichtungen war es möglich, die nötigen Informationen zu ermitteln (siehe Tabelle D.3 und D.5 in Anhang D). Die Tabellen beinhalten, neben dem jeweiligen Anfangs- und Endzeitpunkt der Beobachtung, auch das Azimut- und Höhenintervall der Aurora über dem Horizont. Des Weiteren sind Beobachtungsstandort, Farbe der Aurora und der Be-

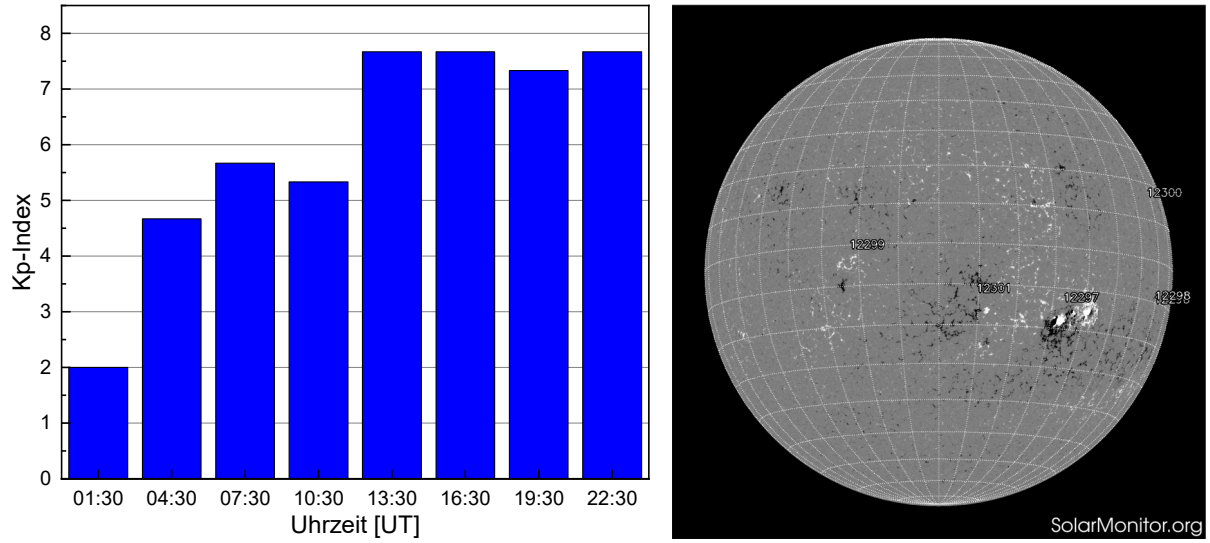


ABBILDUNG 4.7: Links: Verlauf des Kp-Index am 17. März 2015. Nach Beginn des Geomagnetsturms wurde ein maximaler Kp-Index von 8- erreicht. Auf der x-Achse sind die mittleren Zeitpunkte eines 3h-Kp-Intervalls angegeben. Rechts: HMI/SDO Magnetogramm der Sonne am 15. März 2015 mit AR 12297. Der schnelle CME führte zu einem starken G4 Geomagnetsturm am 17. März 2015.

obachter bzw. die Quelle angegeben. Die Verteilung der Beobachtungen zusammen mit dem errechneten und gemessenen CGM- sowie Geomagnetpol ist in Abbildung 4.8 zu sehen.

Anhand dieser Beobachtungen konnte mit den in Tabelle 4.1 beschriebenen Methoden die Position des CGM-Pols sowie der Kp-Index bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 zu sehen. Wie zuvor erwähnt, werden bei der Berechnung mit Methode 3 und 7 die Beobachtungen ignoriert, für die nach dem jeweiligen Modell keine Lösung ermittelt werden konnte. In diesem Fall wurde für die dritte Methode der Azimut auf -18° bis 18° eingeschränkt, was zum Wegfall von 37 Beobachtungen führte. Bei Methode 7 liegt das Intervall zwischen -40° und 40° , was zum Wegfallen von lediglich neun Beobachtungen führt. Wie zu erwarten, sind mehr Beobachtungen mit dem Modell nach *Zhang und Paxton* [2008] verträglich.

Aus Tabelle 4.3 wird ersichtlich, dass die Positionen des CGM-Pols aus allen Methoden (Ausnahme Methode 8) miteinander konsistent sind. Abweichungen liegen hier bei wenigen Grad. Allen Methoden ist gemein, dass sie die geografische Breite des Pols, die im Mittel bei $(83,7 \pm 0,4)^\circ$ N liegt, gut wiedergeben. Die mittlere Länge weicht allerdings mit einem Wert von $(76,4 \pm 2,6)^\circ$ W um etwa 8° von der wahren Position ab. In den hohen Breiten ist der absolute Abstand (siehe vorletzte Spalte in Tabelle 4.3) zwischen wahren Pol und der mittleren CGM-Polposition aller Methoden im Bereich von lediglich (123 ± 6) km. Die Abweichungen können durch die in Abschnitt 4.1.1 beschriebene verein-

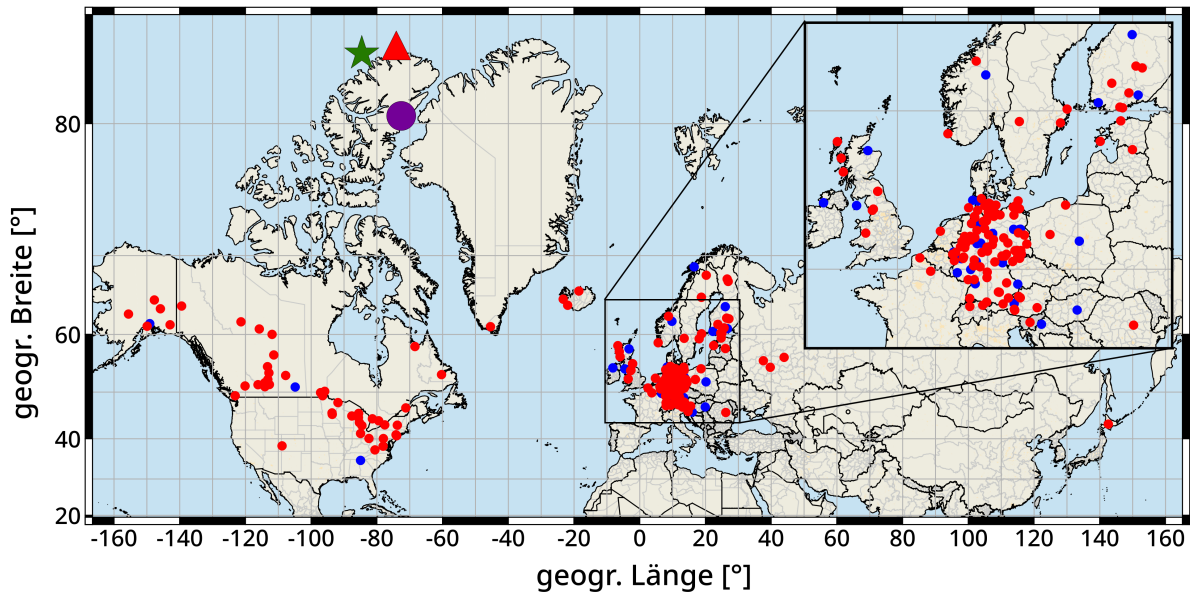


ABBILDUNG 4.8: Dargestellt ist die geografische Verteilung aller 235 gefundenen Polarlichtsichtungen des St. Patrick's Day-Sturms 2015 (rot genutzte und blau ungenutzte Sichtungen). Der grüne Stern zeigt die wahre Position des CGM-Pols nach dem IGRF-12, wobei der violette Kreis den Geomagnetpol nach dem IGRF-12 angibt. Der mittlere berechnete CGM-Pol ist als rotes Dreieck dargestellt.

TABELLE 4.3: Ergebnisse des St. Patrick's Day-Sturms 2015. Die Ergebnisse des Holzworth-Modells sind weiß hinterlegt, wohingegen die Methoden unter Verwendung des ZP-Modells grau gekennzeichnet sind. Alle Ergebnisse sind zusammen mit den 1σ -Fehlern gegeben. Die vorletzte Spalte beschreibt den Abstand zwischen der errechneten und wahren Position des CGM-Pols in km, wobei die letzte Spalte den RMSD angibt. Die letzte Zeile enthält die mittlere Position des CGM-Pols aus allen Berechnungen sowie den mittleren Kp-Index zusammen mit den 1σ -Standardfehlern. Der hier gegebene Abstand ist die Distanz zwischen dem mittleren errechneten und wahren CGM-Pol bei $83,1^\circ$ N und $84,6^\circ$ W.

Nr.	Ansatz	geogr. Breite [°]	geogr. Länge [°]	Kp-Index	Abstand [km]	RMSD
1	A	$82,4 \pm 0,1$	$-72,9 \pm 2,0$	$7,0 \pm 0,6$	181 ± 30	22,90
2	A	$84,3 \pm 0,1$	$-76,6 \pm 1,7$	$8,5 \pm 0,6$	165 ± 8	23,54
3	A	$83,5 \pm 0,1$	$-73,3 \pm 2,1$	$8,1 \pm 0,7$	152 ± 25	26,03
4	B	$83,3 \pm 0,1$	$-73,1 \pm 4,0$	$8,3 \pm 0,7$	159 ± 10	$5,5 \cdot 10^5$
5	A	$82,8 \pm 0,1$	$-73,3 \pm 2,2$	$2,3 \pm 0,1$	161 ± 13	22,94
6	A	$83,2 \pm 0,1$	$-73,5 \pm 2,8$	$2,5 \pm 0,1$	148 ± 37	22,86
7	A	$84,1 \pm 0,1$	$-75,5 \pm 3,1$	$2,6 \pm 0,1$	153 ± 11	23,39
8	B	$85,9 \pm 0,1$	$-92,9 \pm 17,4$	$3,2 \pm 0,5$	324 ± 50	$4,9 \cdot 10^5$
		$83,7 \pm 0,4$	$-76,4 \pm 2,6$	$5,3 \pm 1,1$	123 ± 6	

fachte Transformation zwischen den Koordinatensystemen zustande kommen. Weiterhin wäre es denkbar, dass das Zusammenfassen verschiedener Teilstürme zu Ungenauigkeiten

führt. Daher wurden die Beobachtungen nach Teilstürmen aufgeteilt und anschließend die Rekonstruktion für jeden Teilsturm individuell durchgeführt. Nach Mittelwertbildung der einzelnen Ergebnisse ergab sich jedoch keine signifikante Verbesserung. Dies gilt sowohl für den Sturm von 2015 als auch für die im Folgenden behandelten Stürme von 2003 und 1859. Im Falle des Kp-Index sind klare Unterschiede zu sehen. So sind die Resultate aus den Berechnungen mit dem Modell nach *Zhang und Paxton* [2008] deutlich kleiner als jene aus den Berechnungen mit dem Modell nach *Holzworth et al.* [1975]. Dies ist im Falle eines moderaten Sturms wie dem St. Patrick's Day-Sturm durchaus zu erwarten, da das Oval, beschrieben durch das ZP-Modell, deutlich größer ist als das Oval aus dem Holzworth-Modell. Im Mittel liegt der Kp-Index allerdings bei $\overline{Kp} = 5,3 \pm 1,1$ und deckt sich innerhalb von 2σ mit dem Tagesmittel von $\overline{Kp} \approx 7-$ ($Kp = 6,67$).

Beim Betrachten der RMSD-Werte fällt auf, dass die mit Ansatz A gewonnenen Ergebnisse im gleichen Größenbereich ($\text{RMSD} \sim 23$) liegen. Anders als bei der Berechnung aus synthetischen Beobachtungen ergeben sich hier keine signifikanten Abweichungen aus Methode 1 und 5. Im Falle von Methode 4 und 8 wird auf die Berechnung die Polarlichtposition zurückgegriffen. Durch die Umrechnung in kartesische Koordinaten ergeben sich hier deutlich andere Werte, sodass diese beiden Methoden nur untereinander vergleichbar sind. Die RMSD-Werte zeigen keine eindeutigen Unterschiede zwischen beiden Ovalmodellen. Daher kann an dieser Stelle keines der beiden Modelle als wahrscheinlicher eingestuft werden.

Anhand der geomagnetisch äquaturnächsten Polarlichtposition kann über Gleichung 2.7 der Dst-Index abgeschätzt werden. Dazu muss zunächst anhand der gegebenen Informationen die Position des Polarlichts berechnet werden. Das Vorgehen ist analog zu den in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Schritten. Zunächst wird über Gleichung 4.29 der Abstand g zwischen Beobachter und Polarlicht bestimmt. Mittels Gleichung 4.30 kann anschließend der Differenz zwischen Beobachter und Aurora in Länge und Breite ($\Delta\phi$ und $\Delta\vartheta$) berechnet werden. Addition der Beobachterposition mit $\Delta\phi$ und $\Delta\vartheta$ liefert die Position des Polarlichts. Mit der bekannten Lage des Geomagnetspols aus dem IGRF-12 wurden die ermittelten Positionen in geomagnetische Koordinaten umgerechnet. Die geomagnetisch äquaturnächste Beobachtung wurde mit einer geomagnetischen Breite von $46,78^\circ \text{ N}$ in Hokkaido (JPN) gemacht. Mittels Gleichung 2.7 ergibt sich daraus ein minimaler Dst-Index von -269 nT . Dies liegt sehr nah am gemessenen Wert von $\text{Dst} = -223 \text{ nT}$ aus *Maurya et al.* [2018]. Wie zu erwarten war, kann die geomagnetisch äquaturnächste Beobachtung zum Abschätzen des Dst-Index genutzt werden. Es sei allerdings erwähnt, dass keinerlei Effekte durch das sich verändernde Dipolmoment des Erdmagnetfeldes mit einbezogen wurden, wie sie in *Kataoka und Kiyomi* [2017] diskutiert wurden. Diese spielen insbesondere über große Zeitskalen eine Rolle. Zudem wurde die Position der Aurora in

500 km Höhe als Referenz genommen. Diese Position müsste noch mit den Informationen über Inklination und Deklination des lokalen Magnetfeldes auf den Fußpunkt der Feldlinie auf der Erdoberfläche umgerechnet werden. Da die Berechnung des Dst-Index nicht Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit ist, wurde auf diese Schritte verzichtet und gezeigt, dass selbst eine vereinfachte Abschätzung bereits gute Ergebnisse liefert.

4.2.2 Der Halloween-Sturm vom 29. Oktober 2003

Ende Oktober 2003 im Sonnenzyklus 23 erzeugte AR 486 eine Reihe starker Ausbrüche. Mit einer Größe von etwa 13 Erdradien war AR 486 die größte beobachtete aktive Region seit 1990. Am 28.10.2003 befand sich AR 486 nahe dem Zentrum der Sonnenscheibe (siehe Abbildung 4.9) und produzierte um 11:10 UT einen X17 Ausbruch³ gefolgt von dem viertstärksten CME seit Beginn der Messungen 1976. Dieser CME erreichte am 29.10.2003 um 06:13 UT die Erde und sorgte für einen gewaltigen geomagnetischen Sturm (G5), einhergehend mit extrem hoher Polarlichtaktivität. Der Kp-Index erreichte im Maximum einen Wert von 9 und lag, nach Eintreffen des Sturms am besagten Tag, nicht unter 8—. Dies war der sechststärkste Geomagnetsturm seit 1932 [Balch *et al.*, 2004].

Für diesen Sturm wurden in den verschiedenen Datenbanken im Zeitraum zwischen dem 29.10. und 31.10. insgesamt 207 Beobachtungen identifiziert. Für 128 Beobachtungen konnten die für die Berechnungen nötigen Informationen ermittelt werden (siehe Tabelle D.7 in Anhang D). Die übrigen 79 Beobachtungen sind in Tabelle D.9 in Anhang D aufgelistet. Alle Beobachtungen zusammen mit dem errechneten und wahren CGM-Pol sind in Abbildung 4.10 zu sehen. Die Beobachtungen wurden genutzt, um das in Kapitel 4.1.2 erklärte Verfahren zur Rekonstruktion des Ovals durchzuführen. Dabei konnte die Lage des CGM-Pols sowie der Kp-Index bestimmt werden. Der CGM-Pol lag im Jahr 2003 bei $82,1^\circ$ N und $83,2^\circ$ W, wobei dieser erneut unter Verwendung der Python-Routine *apexpy 1.0.1* aus dem Geomagnetspol des IGRF-12 berechnet wurde. Der mittlere Kp-Index nach Eintreffen des Sturms betrug 8+, wobei ein Maximum von 9 erreicht wurde. Die Ergebnisse in Tabelle 4.4 zeigen größere Abweichungen, als beim 2015-er Sturm. Im Falle von Methode 3 und 7 wurden erneut Beobachtungen aufgrund des eingeschränkten Azimutintervalls vernachlässigt. Dies betrifft bei der dritten Methode 49 Beobachtungen ($-33^\circ \leq \overline{az} \leq 33^\circ$) und 47 Beobachtungen bei Methode 7 ($-35^\circ \leq \overline{az} \leq 35^\circ$). Die errechnete Breite des CGM-Pols liegt im Mittel bei $(76,2 \pm 2,5)^\circ$ N und weicht damit um etwa 6° von der wahren Breite ab. Innerhalb von 3σ sind die Werte allerdings miteinan-

³Sonnenausbrüche werden je nach ihrer Stärke in Kategorien eingeteilt, die mit den Buchstaben A, B, C, M und X gekennzeichnet sind. Dabei beschreibt die Erhöhung um eine Klasse einen zehnfachen Anstieg der Energieabgabe. Diese Klassen sind weiterhin in neun Unterklassen unterteilt, wobei es im Falle der X-Ausbrüche mehr als neun Unterklassen gibt [Schrijver *et al.*, 2010].

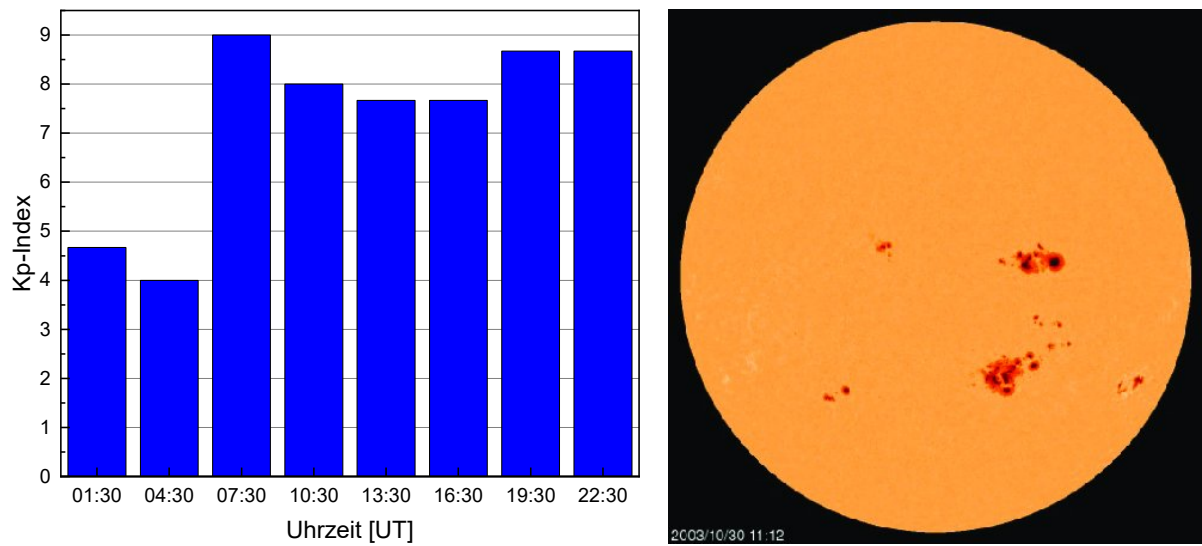


ABBILDUNG 4.9: Links: Verlauf des Kp-Index am 29. Oktober 2003. Nach Eintreffen des Sonnensturms um 06:13 UT lag der Kp-Index bei 9 und blieb im Laufe des Tages über einem Wert von 8—. Auf der x-Achse sind die mittleren Zeitpunkte eines 3h-Kp-Intervalls angegeben. Rechts: Aufnahme der Sonne (MDI/SOHO) am 30. Oktober 2003. In der unteren Hälfte findet sich AR 486 und relativ zentral auf der Sonnenscheibe ist AR 488 zu sehen. Beide aktive Regionen erzeugten mehrere Flares der X-Klasse sowie starke CMEs [Pesnell, 2016].

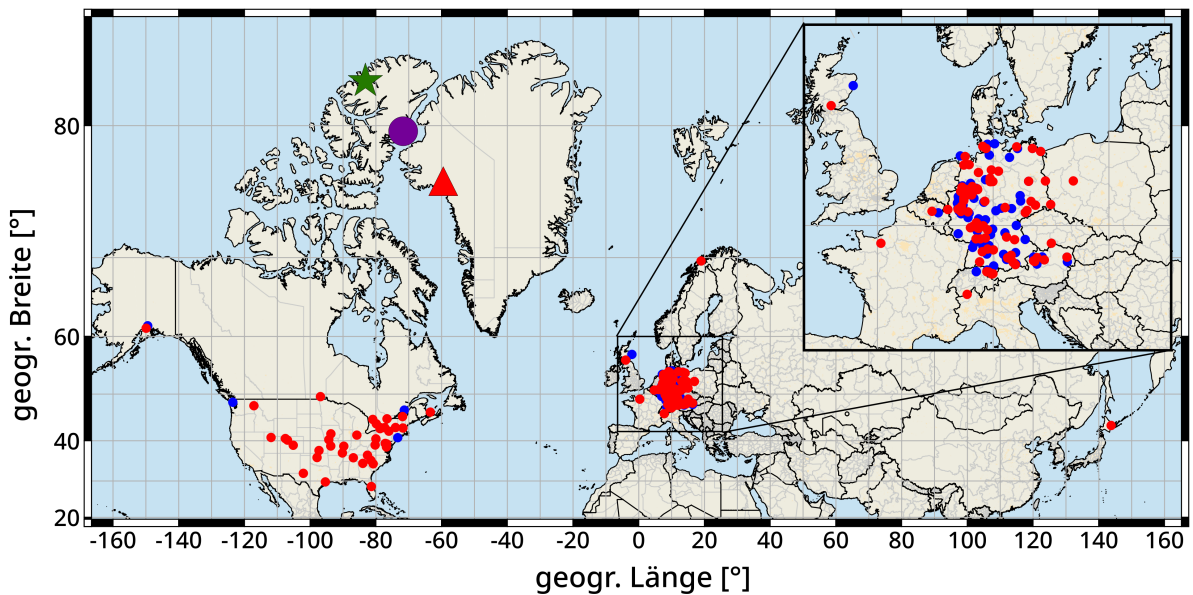


ABBILDUNG 4.10: Dargestellt ist die geografische Verteilung aller 207 gefundenen Polarlichtsichtungen des Halloween-Sturms 2003 (rot genutzte und blau ungenutzte Sichtungen). Der grüne Stern zeigt die wahre Position des CGM-Pols nach dem IGRF-12-Modell, wobei der violette Kreis den Geomagnetpol nach dem IGRF-12-Modell angibt. Der mittlere berechnete CGM-Pol ist als rotes Dreieck dargestellt.

der konsistent. Bei der geografische Länge, die im Mittel bei $(59,9 \pm 7,5)^\circ$ W liegt, ist die mittlere Abweichung mit ca. 23° noch wesentlich größer. Hier sind beide Werte auch innerhalb von 3σ nicht miteinander konsistent. Daraus resultiert ein absoluter Abstand des wahren zum errechneten CGM-Pol von (810 ± 336) km. Der mittlere errechnete Kp-Index liegt bei $\overline{Kp} = 4,2 \pm 0,6$ und ist somit ebenfalls nicht konsistent mit dem gemessenen Tagesmittel von 8+. Insbesondere die Ergebnisse unter Verwendung von Ansatz B liefern eine stark abweichende Position des CGM-Pols. Die RMSD-Werte zeigen ein ähnliches Bild wie für den St. Patrick's Day-Sturm 2015. Erneut liegt der RMSD unter Verwendung von Ansatz A in einem ähnlichen Größenbereich, wobei die Werte im Falle des Sturms von 2003 höher ausfallen als für den 2015-er Sturm. Dies deckt sich mit der größeren Abweichung zwischen dem errechneten und wahren CGM-Pol. Anhand des RMSD kann erneut keines der beiden Modelle bevorzugt werden. Der Unterschied zwischen den beiden modernen Stürmen liegt in der Verfügbarkeit sowie Güte der Daten. Die wenigen Fotografien des Halloween-Sturms sind von deutlich schlechterer Qualität, sodass in mehreren Fällen die Bestimmung der Position des Polarlichts nicht möglich war. Außerdem lagen in vielen Fällen nur Berichte vor, die die erforderlichen Daten weniger genau angeben als dies anhand von Aufnahmen möglich wäre.

TABELLE 4.4: Ergebnisse des Halloween-Sturms 2003. Die Ergebnisse des Holzworth-Modells sind weiß hinterlegt, wohingegen die Methoden unter Verwendung des ZP-Modells grau gekennzeichnet sind. Alle Ergebnisse sind zusammen mit den 1σ -Fehlern gegeben. Die vorletzte Spalte beschreibt den Abstand zwischen der errechneten und wahren Position des CGM-Pols in km, wobei die letzte Spalte den RMSD angibt. Die letzte Zeile enthält die mittlere Position des CGM-Pols aus allen Berechnungen sowie den mittleren Kp-Index zusammen mit den 1σ -Standardfehlern. Der hier gegebene Abstand ist die Distanz zwischen dem mittleren errechneten und wahren CGM-Pol bei $82,1^\circ$ N und $83,2^\circ$ W.

Nr.	Ansatz	geogr. Breite [°]	geogr. Länge [°]	Kp-Index	Abstand [km]	RMSD
1	A	$74,3 \pm 0,2$	$-51,3 \pm 1,2$	$4,6 \pm 0,3$	1104 ± 35	23,49
2	A	$76,0 \pm 0,2$	$-49,2 \pm 1,4$	$4,8 \pm 0,3$	964 ± 38	24,24
3	A	$78,9 \pm 0,2$	$-53,7 \pm 1,3$	$6,4 \pm 0,4$	640 ± 35	27,92
4	B	$69,9 \pm 0,8$	$-47,0 \pm 3,5$	$4,8 \pm 1,1$	1614 ± 128	$1,0 \cdot 10^6$
5	A	$79,6 \pm 0,1$	$-60,0 \pm 1,6$	$2,9 \pm 0,2$	487 ± 32	22,96
6	A	$84,0 \pm 0,1$	$-78,7 \pm 2,6$	$4,7 \pm 0,2$	218 ± 4	23,81
7	A	$81,2 \pm 0,1$	$-96,3 \pm 3,5$	$4,2 \pm 0,3$	235 ± 44	30,23
8	B	$65,2 \pm 0,9$	$-42,9 \pm 4,2$	$1,4 \pm 0,5$	2122 ± 149	$1,1 \cdot 10^6$
		$76,2 \pm 2,5$	$-59,9 \pm 7,5$	$4,2 \pm 0,6$	810 ± 336	

Durch die modernen Stürme konnte gezeigt werden, dass bei einer ausreichend großen Beobachtungszahl, gepaart mit einer guten Datenqualität, die wahre Position des CGM-Pols sowie der Kp-Index gut rekonstruiert werden können. Dies deckt sich mit den Erkennt-

nissen aus Abschnitt 4.1.4, in dem synthetische Beobachtungen genutzt wurden, um die Methode zu validieren. Die modernen Beispiele zeigen jedoch auch, dass eine ungenügend gute Datenqualität, wie im Falle des Halloween-Sturms 2003, zu Abweichungen vor allem in der geografischen Länge des Pols führt. Durch Abweichungen in der Lage des CGM-Pols kommt es folglich auch zu Ungenauigkeiten im Kp-Index. Daher sollte bei weniger oder qualitativ ungenügenden Daten eine Vereinfachung des Programms in dem Sinne erwogen werden, dass die Position des Pols vorgegeben und lediglich der Kp-Index berechnet wird. Unter Vorgabe der oben genannten Position des CGM-Pols aus dem IGRF-12 führt dies zu einem mittleren Kp-Index für den 2003-er Sturm von $8,2 \pm 0,6$, was sehr gut mit dem gemessenen mittleren Kp-Index von $8+$ übereinstimmt. Wird stattdessen ein Kp-Index von 9 (Tagesmaximum) vorgegeben und lediglich die Position des CGM-Pols berechnet, ergab sich keine nennenswerte Verbesserung zu den oben genannten Polpositionen. Bei diesem Sturm liegt die geomagnetisch äquaturnächste Polarlichtposition bei einer Breite von $38,54^\circ$ N und gehört zur Beobachtung aus Orlando in Florida (USA). Daraus ergibt sich ein Dst-Index von -599 nT. Nach *Pulkkinen et al.* [2005] liegt der niedrigste Dst-Index bei -400 nT, was in diesem Fall recht stark von dem hier berechneten Wert abweicht. Grund dafür sind die in Abschnitt 4.2.1 aufgeführten Vereinfachungen in der Abschätzung des Dst-Index.

4.3 Rekonstruktion historischer Stürme

In diesem Abschnitt sollen verschiedene historische Stürme untersucht werden. Als Datenquelle wurde zumeist der Katalog von *Fritz* [1873] genutzt, wobei für die erforderlichen Parameter die Originalberichte gesucht und ausgewertet werden mussten. Insgesamt wurden neun historische Stürme beginnend im Jahr 1716 betrachtet, darunter das Carrington-Event von 1859. Carringtons Beobachtungen eines Weißlichtausbruchs mit den darauffolgenden mächtigen Polarlichtern hatten großen Anteil am Verständnis zwischen Sonnenaktivität und dem Auftreten der Aurorae [*Cliver*, 2006]. Neben diesem außergewöhnlich starken Sturm werden auch die Geomagnetstürme von 1716, Februar und Oktober 1730, 1737, 1770, 1847, 1872 und 1882 untersucht. Die Wahl fiel auf diese Stürme, da aus dem Katalog von *Fritz* [1873] eine genügend große Anzahl an Beobachtungen hervorgeht. Zudem sind teilweise ostasiatische Sichtungen bekannt, sodass eine gute globale Abdeckung von Beobachtungen gewährleistet ist. Im Folgenden wird auf die Stürme im Einzelnen eingegangen.

4.3.1 Das Carrington-Event 1859

Nach Schwabes Entdeckung des Sonnenfleckenzyklus [Schwabe, 1844] begann Carrington ebenfalls mit Sonnenfleckenbeobachtungen, um weitere Regelmäßigkeiten im Zyklus zu untersuchen. Dabei entdeckte Carrington mitunter die differentielle Rotation der Sonne [Carrington, 1859b] sowie die Veränderung in der heliografischen Breite der Sonnenflecken im Laufe eines Zyklus [Carrington, 1859a]. Am 01. September 1859 gelang es Carrington einen Weißlichtausbruch der Sonne zu beobachten, also einen Ausbruch, der auch im visuellen Spektrums des Lichts sichtbar ist. Unabhängig davon konnte auch Richard Hodgson diese Beobachtung bestätigen [Cliver, 2006]. Carrington veröffentlichte seine Beobachtung in *Carrington* [1860], wo er auch die in Abbildung 4.11 gezeigte Zeichnung der den Ausbruch erzeugenden Sonnenfleckengruppe präsentierte. Nach Abschätzungen von Cliver et al. [2013] entspricht die Stärke einem Ausbruch der $X45 \pm 5$ Klasse. Ein Tag nach dieser Beobachtung kam es zu extrem hoher Polarlichtaktivität auf der ganzen Welt [Farrona et al., 2011]. Dabei konnten Polarlichter auch bei ungewöhnlich niedrigen geografischen Breiten beobachtet werden und der Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und dem Auftreten von Polarlichtern wurde klar [Cliver, 2006].

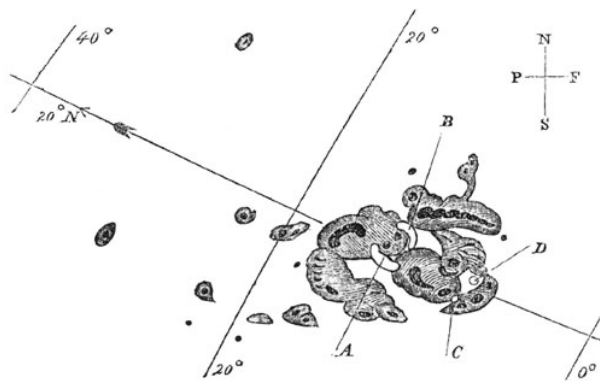


ABBILDUNG 4.11: Carringtons Zeichnung der Sonnenfleckengruppe, die am 01.09.1859 einen Weißlichtausbruch produzierte. Zu Beginn war der Ausbruch an den mit A und B gekennzeichneten Positionen zu sehen. Die Endpositionen der Weißlichtemission befinden sich bei C und D [Carrington, 1860].

Heute wird davon ausgegangen, dass der Carrington-Sturm der größte Geomagnetsturm der letzten 150 Jahre ist [Farrona et al., 2011]. Dieser Extremfall eines Geomagnetsturms soll ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden. Um das Polarlichtoval zu rekonstruieren, ist es erforderlich genaue zeitgenössische Berichte des Carrington-Events zu studieren und die für die Methode benötigten Daten zu extrahieren. Insgesamt wurden 532 Beobachtungen identifiziert, wobei für 167 Sichtungen alle erforderlichen Informationen ermittelt werden konnten. Die genutzten sowie ungenutzten Sichtungen sind in Anhang D in Tabelle D.11 und Tabelle D.13

aufgelistet. Die geografische Verteilung aller 532 Beobachtungen ist in Anhang D in Abbildung D.3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Polarlichter bei äußerst geringen Breiten gesichtet wurden. So gibt es Beobachtungen zum Beispiel in der Karibik und auf Hawaii. Unter den Beobachtungen mit allen erforderlichen Informationen ist die geografisch äqua-

tornächste Polarlichtposition in Sabine (Nicaragua) bei einer Breite von $11,23^\circ$ N. Neben den Polarlichtsichtungen selbst gibt es einige Magnetogramm-Messungen wie zum Beispiel aus Bombay. Zudem finden sich häufig Berichte über gestörte Telegraphenleitungen. Da diese Störungen aber nicht notwendigerweise mit sichtbaren Polarlichter einhergehen und zudem nur die Uhrzeit und eine grobe Position der aufgetretenen Störung abgeschätzt werden kann, werden im Falle des Carrington-Events und den noch folgenden historischen Stürmen Berichte solcher Auffälligkeiten nicht verwendet.

Wie in *Hayakawa et al.* [2019] erwähnt, können die Polarlichtbeobachtungen zwischen dem 28.08. und 05.09.1859 in zwei unterschiedliche Geomagnetstürme eingeteilt werden. Da eine genügend große Anzahl von Beobachtungen für die Rekonstruktion des Ovals erforderlich ist, wird bei allen Berechnungen auf Beobachtungen der Südhalbkugel verzichtet, da diese nicht in ausreichend großer Anzahl vorliegen, um auch das südliche Oval zu berechnen.

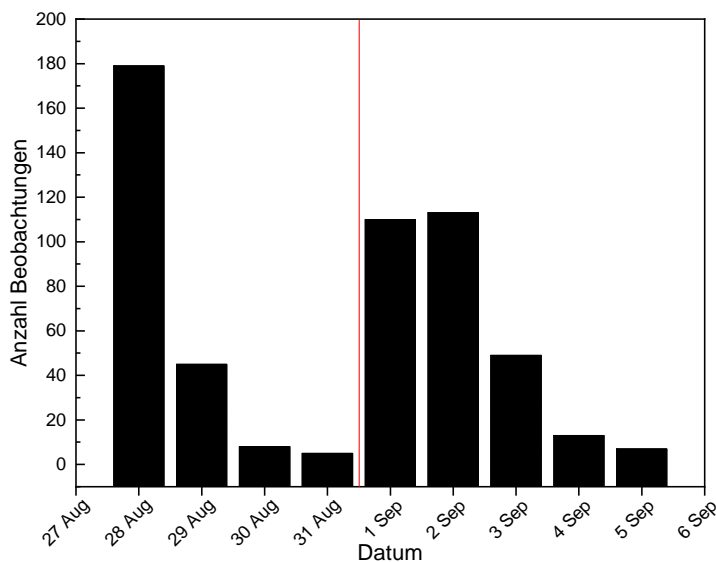


ABBILDUNG 4.12: Häufigkeitsverteilung der Polarlichtbeobachtungen des Carrington-Events. Erkennbar sind zwei Häufungen von Sichtungen um den 28.08. sowie 02.09. mit einem Minimum am 31.08. Daher ist es sinnvoll diese Sichtungen in zwei Zeiträume einzuteilen.

dung 4.13 zu sehen.

Erneut wurden die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Methoden zur Rekonstruktion des Ovals durchgeführt. Für Methode 3 und 7 musste in beiden Fällen wieder eine Einschränkung des Azimutintervalls vorgenommen werden ($-40^\circ \leq \bar{\alpha} \leq 40^\circ$). Dies resultiert in 63 verbleibenden Beobachtungen im August sowie 69 Beobachtungen für den September. Die Ergebnisse für den August sowie September des Carrington-Events sind in Tabelle

Die Häufigkeitsverteilung der 532 hier verwendeten Beobachtungen (siehe Abbildung 4.12) zeigt ebenfalls das Vorhandensein zweier Stürme. Es sind deutlich zwei Peaks in der Polarlichthäufigkeit mit einem Minimum am 31. August erkennbar. Daher ist es sinnvoll, das Carrington-Event in zwei Zeiträume einzuteilen, wobei der erste vom 28.08. bis 31.08. reicht und der zweite vom 01.09. bis 05.09.1859. Damit ergeben sich für den August 81 und für den September 86 Beobachtungen mit allen erforderlichen Informationen. Die geografische Verteilung der Beobachtungen ist in Abbil-

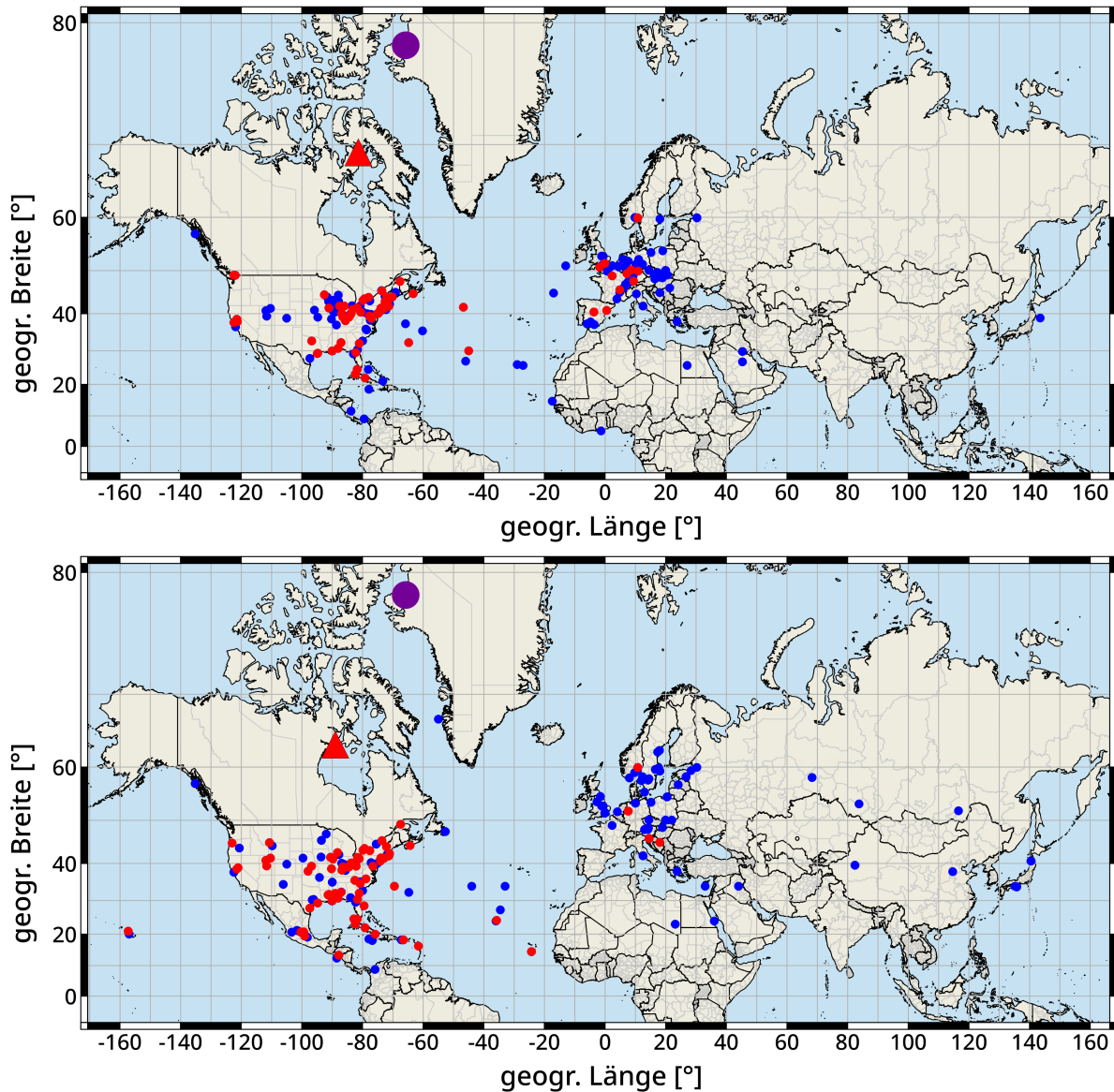


ABBILDUNG 4.13: Die obere Grafik zeigt in rot die genutzten Sichtungen zwischen dem 28.08. und 31.08.1859 zusammen mit dem Geomagnetspol aus dem *gufm1*-Modell (violetter Kreis) und die mittlere berechnete Lage des CGM-Pols (rotes Dreieck). Die blauen Punkte zeigen die ungenutzten Sichtungen aus dem August. Die untere Abbildung zeigt das Gleiche für die Beobachtungen zwischen dem 01.09. und 05.09.1859.

4.5 aufgelistet. In beiden Fällen konnte mit Methode 5 kein Ergebnis erzielt werden, da keine klaren Peaks in den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Parameter vorhanden waren. Im oberen Bereich sind die Ergebnisse der Beobachtungen zwischen dem 28.08. und 31.08.1859 dargestellt. Die geografische Breite des CGM-Pols weicht bei den verschiedenen Varianten der Rekonstruktion voneinander ab. Die Abweichung liegt aber im Bereich von 8° , sodass sich eine mittlere Breite des CGM-Pols anhand der Augustbeobachtungen von $(69,7 \pm 1,0)^\circ \text{N}$ ergibt. Die mittlere Länge liegt bei $(88,9 \pm 8,9)^\circ \text{W}$. Um diese Ergeb-

nisse zu vergleichen, wird das *gufm1*-Modell von *Jackson et al.* [2000] verwendet. Wie erwähnt basiert es auf direkten Feldmessungen und gibt die Lage des Geomagnetpols an. Dieser soll bei älteren Stürmen anstatt des CGM-Pols zum Vergleich herangezogen werden. Nach dem *gufm1* lag der Geomagnetpol 1859 bei $79,3^\circ$ N und $80,5^\circ$ W. Damit weicht die ermittelte Länge etwa 8° von der gemessenen Länge ab. Die Breite ist hingegen etwa 10° geringer als im Modell angegeben. Beim Betrachten der Verteilung der Beobachtungen in Abbildung 4.13 wird ersichtlich, dass keine ostasiatische Sichtung mit allen erforderlichen Informationen vorliegt. Für die synthetischen Beobachtungen (siehe Kapitel 4.1.4) war der Einfluss auf die Ergebnisse vernachlässigbar. Da im Falle des Carrington-Events allerdings beide Ovalmodelle die Ausmaße des Ovals unterschätzen, kommt es zu Abweichungen bei fehlenden ostasiatischen Sichtungen. So wird trotz des hohen Kp-Index, der im August im Mittel bei $8,4 \pm 0,3$ lag, die Breite des CGM-Pols Richtung Äquator gezogen, um auch sehr südliche Beobachtungen mit den Ovalmodellen zu vereinbaren. Eine Verbesserung könnte erzielt werden, wenn ostasiatische Sichtungen mit allen Informationen gefunden werden. Auf diese Weise könnte vermieden werden, dass der CGM-Pol zu geringeren Breiten gezogen wird, da dann auch ostasiatische Sichtungen mit der Position des Ovals vereinbar sein müssten.

Die Ergebnisse der Septemberbeobachtungen zeigen ein ähnliches Bild. Die ermittelte Position des CGM-Pols liegt im Mittel bei $(61,1 \pm 1,8)^\circ$ N und $(83,6 \pm 4,7)^\circ$ W. In der Länge zeigt sich eine Abweichung von etwa 3° , wobei die Differenz in der Breite mit 18° noch stärker ausfällt als zuvor. Beim Betrachten der Beobachtungsverteilung in Abbildung 4.13 wird klar, dass im September südlichere Beobachtungen mit allen erforderlichen Informationen vorliegen als im August. Folglich wird der CGM-Pol noch weiter zu niedrigen Breiten hin verschoben, da die Modelle die Größe des Ovals in diesem extremen Fall unterschätzen und erneut keine ostasiatischen Sichtungen mit allen Informationen verfügbar sind. Anhand der südlicheren Beobachtungen auf der Nordhemisphäre im Vergleich zum August ist zu vermuten, dass der September-Sturm noch stärker war, als jener im August. Der mittlere Kp-Index, der $7,4 \pm 0,7$ beträgt, spiegelt dies jedoch nicht wider. Das kann über die etwa 8° geringere Breite des CGM-Pols im September erklärt werden. Durch die südlichere Position sind die Beobachtungen auch mit einem kleineren Oval und damit einem geringeren Kp-Index verträglich. Sowohl für die Position des Pols als auch für den Kp-Index wurde beim Mitteln Methode 1 (nach Tabelle 4.5) ausgeschlossen, da diese offensichtlich ein falsches Ergebnis liefert, wobei das Einschränken des Kp- und Breiten-Intervalls nicht zu einer Verbesserung führte. Allgemein liefert das Modell nach *Zhang und Paxton* [2008] für das Carrington-Event eine Position des CGM-Pols, die besser mit dem Wert aus dem *gufm1*-Modell verträglich ist. Dies wäre mit der größeren Ovalausdehnung nach dem ZP-Modell erklärbar. Dennoch scheint hier nach wie vor

4.3 Rekonstruktion historischer Stürme

TABELLE 4.5: Ergebnisse des Carrington-Events zwischen dem 28.08. und 31.08.1859 (oben) und dem 01.09. und 05.09.1859 (unten). Die Ergebnisse des Holzworth-Modells sind weiß hinterlegt, wohingegen die Methoden unter Verwendung des ZP-Modells grau gekennzeichnet sind. Alle Ergebnisse sind zusammen mit den 1σ -Fehlern gegeben. Die vorletzte Spalte beschreibt den Abstand zwischen dem errechneten CGM-Pol und dem Geomagnetpol nach dem *gufm1-Modell* in km, wobei die letzte Spalte den RMSD angibt. Die letzte Zeile enthält die mittlere Position des CGM-Pols aus allen Berechnungen sowie den mittleren Kp-Index zusammen mit den 1σ -Standardfehlern. Der hier gegebene Abstand ist die Distanz zwischen dem mittleren errechneten CGM-Pol und dem Geomagnetpol nach dem *gufm1-Modell* bei $79,3^\circ$ N und $80,5^\circ$ W.

Nr.	Ansatz	geogr. Breite [°]	geogr. Länge [°]	Kp-Index	Abstand [km]	RMSD
1	A	$70,1 \pm 0,1$	$-94,5 \pm 2,5$	$8,6 \pm 0,5$	1092 ± 14	39,09
2	A	$70,0 \pm 0,2$	$-93,2 \pm 4,1$	$8,7 \pm 0,4$	1190 ± 16	38,02
3	A	$72,0 \pm 0,1$	$-62,8 \pm 0,8$	$8,8 \pm 0,2$	936 ± 30	45,54
4	B	$65,6 \pm 0,1$	$-66,3 \pm 0,5$	$8,8 \pm 0,1$	1583 ± 15	$9,3 \cdot 10^5$
5	A	-	-	-	-	-
6	A	$73,2 \pm 0,9$	$-133,6 \pm 38,4$	$8,0 \pm 0,8$	1488 ± 641	38,16
7	A	$70,1 \pm 0,4$	$-80,7 \pm 3,7$	$6,9 \pm 0,2$	1020 ± 44	43,57
8	B	$67,0 \pm 0,1$	$-91,0 \pm 0,2$	$9,0 \pm 0,1$	1400 ± 10	$2,2 \cdot 10^6$
		$69,7 \pm 1,0$	$-88,9 \pm 8,9$	$8,4 \pm 0,3$	1088 ± 55	
Nr.	Ansatz	geogr. Breite [°]	geogr. Länge [°]	Kp-Index	Abstand [km]	RMSD
1	A	$52,5 \pm 0,3$	$-100,4 \pm 0,4$	$0,2 \pm 0,1$	3073 ± 29	41,98
2	A	$62,2 \pm 0,1$	$-97,9 \pm 0,6$	$4,1 \pm 0,1$	1985 ± 5	43,19
3	A	$66,3 \pm 0,1$	$-88,3 \pm 0,9$	$8,1 \pm 0,7$	1462 ± 7	46,10
4	B	$64,4 \pm 0,1$	$-73,4 \pm 0,6$	$8,8 \pm 0,2$	1670 ± 14	$1,3 \cdot 10^6$
5	A	-	-	-	-	-
6	A	$56,9 \pm 0,3$	$-72,3 \pm 1,3$	$7,3 \pm 0,1$	2510 ± 39	61,47
7	A	$54,8 \pm 0,1$	$-69,1 \pm 0,9$	$7,3 \pm 0,1$	2752 ± 46	63,87
8	B	$62,3 \pm 0,1$	$-92,8 \pm 0,2$	$9,0 \pm 0,1$	1931 ± 10	$2,1 \cdot 10^6$
		$61,1 \pm 1,8$	$-83,6 \pm 4,7$	$7,4 \pm 0,7$	2026 ± 190	

eine Unterschätzung der Größe des Ovals bei solch einem extremen Sturm vorzuliegen. Beim Betrachten des RMSD für September wird deutlich, dass die Beobachtungen im Gegensatz dazu besser mit dem Holzworth-Modell verträglich sind. Im August hingegen liefern erneut beide Modelle ähnliche RMSD-Werte. Insgesamt repräsentieren aber beide Modelle die Beobachtungsverteilung weniger gut, als im Falle der moderneren Stürme von 2003 und 2015.

Da die ermittelte Position des CGM-Pols für das Carrington-Event nicht gut mit der Geomagnetpolposition des *gufm1-Modell* übereinstimmt, wird die Rekonstruktion erneut auf die ausschließliche Berechnung des Kp-Index beschränkt. Als Position des Pols wird der Geomagnetpol aus dem *gufm1-Modell* verwendet. Damit konnten Kp-Indizes ermit-

telt werden, die die wahre geomagnetische Aktivität besser wiedergeben. Auf diese Weise ergab sich für den August ein mittlerer Kp-Index von $8,2 \pm 0,3$. Im Vergleich dazu lag der mittlere Kp-Index im September bei $8,7 \pm 0,2$. Wie anhand der Beobachtungsverteilung vermutet wurde, zeigt sich hier ein höherer Kp-Index für die Septemberbeobachtungen. Allerdings sind beide Werte innerhalb der 1σ -Fehler konsistent, weshalb kein signifikanter Unterschied vorliegt. Allgemein liegen die ermittelten Kp-Werte am oberen Ende der Skala, womit extrem starke geomagnetische Aktivität erreicht wurde.

Wie bei den modernen Stürmen von 2015 und 2003 gezeigt wurde, kann anhand der geomagnetisch äquaturnächsten Polarlichtbeobachtung der Dst-Index abgeschätzt werden. Dafür muss die Position der Aurora in geomagnetischen Koordinaten bestimmt werden, wozu die Lage des Geomagnetpols aus dem *gufm1*-Modell entnommen wird. Im August lag die südlichste Polarlichtposition der Nordhemisphäre bei einer geomagnetischen Breite von $32,69^\circ$ N und kann einer Beobachtung am 28. August 1859 in Kuba (CUB) zugeordnet werden. Mittels Gleichung 2.7 folgt daraus ein Dst-Index von -929 nT für den August. Das geomagnetisch äquaturnächste Polarlicht liegt im September bei $26,73^\circ$ N und stammt von einer Beobachtung am 01.09. auf dem Meer bei den geografischen Koordinaten $14,5^\circ$ N und $24,3^\circ$ W. Mit diesem Wert ergibt sich nach Gleichung 2.7 ein Dst-Index von -1327 nT. Nach *Siscoe et al.* [2006] liegt der Dst-Index des Carrington-Events bei -850 nT, was gut mit dem hier ermittelten Wert für den August übereinstimmt. Dieser Wert wurde anhand eines Magnetogramms aus Bombay nach Bildung eines stündlichen Mittelwerts berechnet. Wird auf die Mittelung verzichtet, so ergibt sich ein Dst-Index von -1600 nT. Der hier ermittelte Wert des Septembers liegt innerhalb dieses Intervalls mit Tendenz zum extremeren Wert. Es wird darauf hingewiesen, dass wieder eine vereinfachte Berechnung erfolgte. Dennoch sind beide Werte gut mit den Literaturangaben verträglich.

4.3.2 Untersuchung weiterer historischer Stürme

Neben dem Carrington-Event wurden weitere historische Geomagnetstürme von 1716, Februar und Oktober 1730, 1737, 1770, 1847, 1872 und 1882 untersucht. Die Beobachtungen sind in Anhang D in Tabelle D.15 bis D.24 aufgelistet. Die geografische Verteilung aller Stürme zusammen mit der Position des Geomagnetpols nach dem *gufm1*-Modell von *Jackson et al.* [2000] sind in Anhang D in Abbildung D.6 und D.7 dargestellt. Abbildung 4.14 zeigt die Zeitpunkte der historischen Geomagnetstürme zusammen mit der mittleren jährlichen Sonnenfleckenzahl. Dabei erkennt man, dass die Stürme in allen Fällen im Sonnenmaximum oder nahe des Sonnenmaximums auftraten.

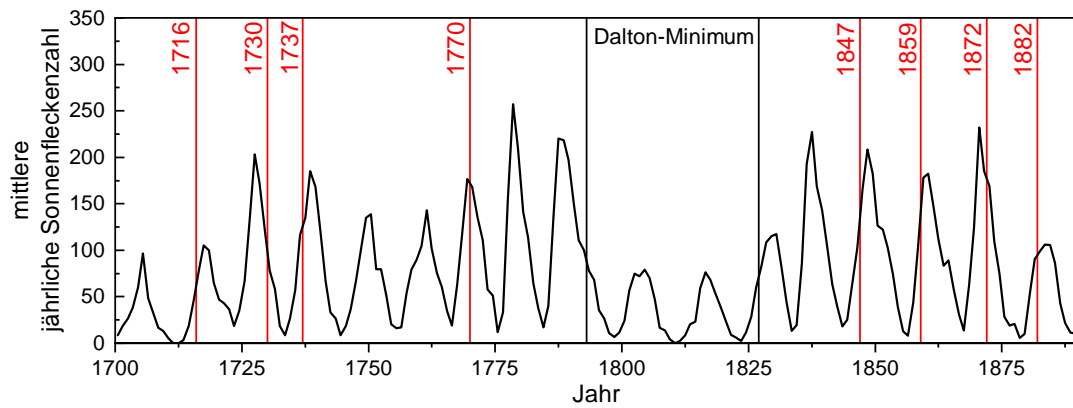


ABBILDUNG 4.14: Übersicht über die Zeitpunkte der untersuchten historischen Geomagnetstürme zusammen mit der mittleren jährlichen Sonnenfleckenanzahl. Zu erkennen ist auch das Dalton-Minimum von 1793 bis 1827 [Clette et al., 2020].

Bei den historischen Stürmen liegen bisher nur für einige Beobachtungen die erforderlichen Daten vor, weshalb die Position des Pols bis auf wenige Ausnahmen nur sehr ungenau bestimmt werden konnte. Dies gilt sowohl für die Berechnungen aller drei Parameter (Länge und Breite des CGM-Pols sowie Kp-Index) als auch für die Bestimmung der Polposition bei vorgegebenem Kp-Index. Daher wird sich auf die Berechnung des Kp-Index beschränkt, wobei sich diese Ergebnisse ändern können, wenn die Originalberichte der übrigen Quellen gesichtet wurden. Um vorläufige Ergebnisse zu erzielen, wird für bisher nicht genauer betrachtete Sichtungen angenommen, dass die Beobachtung am jeweiligen Standort um lokal Mitternacht erfolgte und sich das Polarlicht im Zenit befand, sich also die Position der Aurora mit der des Beobachters deckte. Unter diesen Annahmen war es möglich, den vorläufigen Kp-Index für die acht historischen Stürme zu bestimmen. Tabelle 4.6 zeigt jeweils den mittleren Kp-Index aus den verschiedenen Methoden. Dabei fällt auf, dass in allen Fällen ein sehr hoher Kp-Index berechnet wurde. Die Stürme vom Februar 1730, 1770, 1872 und 1882 liegen mit einem Kp-Index von 9– bis 9 am oberen Ende der Kp-Skala. Die anderen Stürme, mit Ausnahme von 1716, liegen ebenfalls im Bereich von 8 bis 8+. Der Sturm von 1716 hingegen hat einen moderateren Kp-Index von $7,2 \pm 0,4$ und ist damit etwa vergleichbar mit dem St. Patrick’s Day-Sturm 2015.

In allen Fällen wurde über Gleichung 2.7 aus der geomagnetisch äquatornächsten Beobachtung der Dst-Index abgeschätzt. Dabei wurde ebenfalls angenommen, dass sich die Polarlichtposition mit der des Beobachters deckt, die Aurora also im Zenit zu sehen war. Folglich ist der angegebene Dst-Index lediglich eine untere Grenze. Zudem gilt es zu bedenken, dass möglicherweise weitere, bisher unentdeckte Beobachtungen der Polarlichter bei noch geringeren Breiten gemacht wurden. Die Position des Geomagnetpols wurde dem *gufm1*-Modell entnommen.

TABELLE 4.6: Ermittelte Kp-Indizes für acht historische Geomagnetstürme. Der angegebene Kp-Index ist der Mittelwert aus den verschiedenen in Tabelle 4.1 beschriebenen Methoden zusammen mit dem 1σ -Standardfehler.

Datum	# Beob.	Kp-Index	Dst [nT]
15.03. - 17.03.1716	58	$7,2 \pm 0,4$	≥ -412
15.02. - 19.02.1730	65	$8,9 \pm 0,1$	≥ -418
20.10. - 26.10.1730	23	$8,3 \pm 0,3$	≥ -324
15.12. - 18.12.1737	38	$8,0 \pm 0,4$	≥ -326
10.09. - 18.09.1770	109	$8,9 \pm 0,1$	≥ -1880
22.10. - 29.10.1847	50	$8,0 \pm 0,5$	≥ -452
30.01. - 06.02.1872	153	$8,6 \pm 0,3$	≥ -2422
12.11. - 20.11.1882	59	$8,6 \pm 0,1$	≥ -411

Anhand des Dst-Index ist erkennbar, dass die meisten Stürme vergleichbar mit dem Halloween-Sturm 2003 oder mit dem St. Patrick's Day-Sturm 2015 sind. Die Ergebnisse für 1770 und 1872 sind allerdings auffällig. Der Dst-Index ist hier noch geringer als beim Carrington-Event. Beide Stürme haben einen Kp-Index von $8,9 \pm 0,1$ und sind damit zweifellos als extrem starke Geomagnetstürme einzustufen. Die sehr niedrigen Dst-Werte verfälschen das Bild allerdings. Wie erwähnt, wurde angenommen, dass die Polarlichter im Zenit beobachtet wurden, was insbesondere bei geringen Breiten als unwahrscheinlich anzusehen ist. Aus Gleichung 4.29 geht hervor, dass die Position der Aurora bei einer Sichtung 5° über dem Horizont und unter Annahme einer absoluten maximalen Polarlichthöhe von 500 km etwa 18° abweicht. Bei einer Beobachtung in Nordrichtung wäre das Polarlicht also 18° nördlicher als der Beobachter. Unter dieser Bedingung würde sich der Dst-Index im Jahre 1770 zu -688 nT und im Jahre 1872 zu -1301 nT verringern. Damit wären diese Stürme nach wie vor die stärksten in diesem Abschnitt behandelten Events, allerdings schwächer als der Carrington-Sturm. Für all diese Berechnungen wurde die unveränderte Form von Gleichung 2.7 aus *Yokoyama et al.* [1998] zugrunde gelegt. *Kataoka und Kiyomi* [2017] argumentieren allerdings, dass eine Korrektur aufgrund des in den letzten Jahrhunderten abnehmenden Dipolmomentes des Erdmagnetfeldes erfolgen muss, welche hier nicht einbezogen wurde. Auch die Berechnung des Feldlinienfußpunktes wurde vernachlässigt. Daher deckt sich der hier ermittelte Wert für 1872 auch nicht mit dem Dst-Index von -830 nT, der in *Hayakawa et al.* [2018c] beschrieben wird. Auch *Hayakawa et al.* [2018c] weisen darauf hin, dass der Dst-Index aus der äquatornächsten Auroraposition den Dst-Index vermutlich unterschätzt, also extremere Werte ermittelt werden, als dies tatsächlich der Fall war. Für 1882 gibt *Love* [2017] einen Dst-Index von -386 nT an und vergleicht die Stärke des Sturms mit dem Halloween-Sturm 2003. Damit

deckt sich das Ergebnis aus *Love* [2017] mit dem hier präsentierten.

Für einige Stürme lieferte auch die Berechnung einschließlich der Polposition gute Ergebnisse. So konnte anhand der 15 Beobachtungen aus dem Jahre 1716, die alle erforderlichen Informationen enthalten, mit Methode 7 eine Position des CGM-Pols von $(83,3 \pm 0,2)^\circ \text{N}$ und $(52,3 \pm 24,5)^\circ \text{W}$ bestimmt werden. Der Geomagnetpol nach dem *gufm1* liegt bei $81,2^\circ \text{N}$ und $49,1^\circ \text{W}$. Die Abweichungen liegen sowohl in Breite als auch in Länge bei etwa 2° , was einem Abstand beider Pole von $(239 \pm 47) \text{ km}$ entspricht. Der hier berechnete Kp-Index liegt bei $7,0 \pm 0,4$ und ist damit konsistent mit den in Tabelle 4.6 angegebenen Werten. Für den Sturm im Oktober 1730 liefert ebenfalls Methode 7 eine gute Position des CGM-Pols von $(82,1 \pm 0,1)^\circ \text{N}$ und $(80,9 \pm 10,3)^\circ \text{W}$, wobei sich der Geomagnetpol aus dem *gufm1* bei $80,7^\circ \text{N}$ und $52,9^\circ \text{W}$ befindet. Die Abweichung in der Breite beträgt $1,4^\circ$, wohingegen die geografische Länge um 28° abweicht. Letztere ist innerhalb des 3σ -Fehlers mit dem wahren Wert konsistent. Der absolute Abstand beträgt aufgrund der hohen Breite $(485 \pm 157) \text{ km}$. Der hier errechnete Kp-Index liegt bei $(6,5 \pm 0,4)$ und ist somit verschieden von dem in Tabelle 4.6 angegebenen Wert. Dies hängt mit der Abweichung des Pols in der geografischen Länge zusammen. Zu guter Letzt konnte auch die CGM-Polposition des Sturms 1847 anhand von 46 Beobachtungen ermittelt werden. In diesem Fall lieferte Methode 3 das beste Ergebnis. Die errechnete Position des CGM-Pols liegt mit $(74,4 \pm 0,2)^\circ \text{N}$ und $(50,0 \pm 0,9)^\circ \text{W}$ lediglich $(612 \pm 33) \text{ km}$ neben der *gufm1* Geomagnetpolposition von $78,7^\circ \text{N}$ und $64,9^\circ \text{W}$. Erneut beträgt die Diskrepanz in der Breite nur 1° . Im Vergleich dazu weicht die Länge mit 14° weiter ab. Für den Kp-Index ergab sich ein Wert von $(8,6 \pm 0,5)$, was sich mit dem Ergebnis aus Tabelle 4.6 deckt.

Allen historischen Geomagnetstürmen ist gemein, dass insbesondere die geografische Breite des Pols genau bestimmt werden kann, wohingegen in der Länge Abweichungen von $\sim 10^\circ$ auftauchen können. Dies ist das gegenteilige Verhalten zu den Ergebnissen des Carrington-Events, bei dem die Länge bessere Ergebnisse lieferte als die Breite. Allgemein kann geschlussfolgert werden, dass für moderate bis starke Stürme die geografische Breite des CGM-Pols genauer bestimmt werden kann. Lediglich für extreme Stürme wie das Carrington-Event kommt es aufgrund der Unterschätzung der Ovalgröße in beiden Modellen zu einer Abweichung in der ermittelten Breite des Pols. Mit Sichtungen weiterer Originalquellen können die Ergebnisse der historischen Stürme verbessert werden. Beim Betrachten der Beobachtungsverteilung in Abbildung D.7 in Anhang D, scheint insbesondere der Geomagnetsturm von 1872 interessant, da hier mit 153 Beobachtungen eine Vielzahl von Sichtungen vorliegt, die zudem eine sehr gute geografische Abdeckung aufweisen. Daher sind bei diesem Sturm, nach Bestimmung aller Informationen, große Verbesserungen zu erwarten.

Kapitel 5

Fazit und Ausblick

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe anhand von bodengebundenen Polarlichtbeobachtungen die Lage sowie Größe des Polarlichtovals rekonstruiert werden kann. Daraus können Informationen über die Position des CGM-Pols und den Kp-Index abgeleitet werden, der wiederum mit der Sonnenaktivität korreliert. Zunächst wurden in Kapitel 3.2.2 globale UV-Aufnahmen des Dynamics Explorer 1 genutzt, um über geometrische Analysen für das Sonnenmaximum und Sonnenminimum die Abhängigkeit des Polarlichtovalradius sowie die Verschiebung des Ovalzentrums vom Kp-Index zu untersuchen. Für das Sonnenmaximum wurden 244 Aufnahmen aus den Jahren 1981/82 verwendet. In die Berechnung für das Minimum gingen 220 Aufnahmen aus den Jahren 1986 und 1987 ein. Für beide Phasen der solaren Aktivität konnte ein linearer Anstieg des Radius ermittelt werden. Dieser deckt sich mit den Ergebnissen aus *Gussenhoven et al.* [1983] und ist konsistent mit den Vorhersagen aus den Ovalmodellen von *Holzworth et al.* [1975] und *Zhang und Paxton* [2008]. Jedoch ist der Radius des Ovals für einen Kp-Index von 0 geringer als in *Gussenhoven et al.* [1983] angegeben. Das liegt daran, dass *Gussenhoven et al.* [1983] die äquaturnahe Grenze des Ovals nutzten im Gegensatz zum Helligkeitsmaximum, welches in dieser Arbeit verwendet wurde. Dies ist analog zum Vorgehen in *Milan et al.* [2009], weshalb sich deren ermittelter Radius für $K_p = 0$ mit den Ergebnissen dieser Arbeit deckt. Allerdings ist der von *Milan et al.* [2009] gegebene Anstieg größer als in anderen Arbeiten, weicht also vom Anstieg in der vorliegenden Arbeit sowie den Ergebnissen aus *Gussenhoven et al.* [1983] und *Carbary* [2005] ab. Weiterhin kann das CH-Aurora-2014-Modell von *Xiong und Lühr* [2014] zum Vergleich herangezogen werden. Dazu wird der Radius über beide Hemisphären sowie beide Ovalgrenzen gemittelt, was für einen Kp-Index von 0 gut mit dem hier gefundenen Radius übereinstimmt.

Für die Verschiebung des Ovalzentrums in Mitternachtsrichtung gegenüber dem geomagnetischen Pol, waren zuvor Werte zwischen 3° [Akasofu, 2009] und 5° [Milan et al., 2009] gegeben, wobei eine Abhängigkeit von der magnetischen Aktivität in Form des Kp-Index nicht untersucht wurde. Das CH-Aurora-2014-Modell gibt eine Zunahme der Verschiebung der äquatornahe Grenze an, wohingegen die Verschiebung im Falle der polnahen Grenze leicht abzunehmen scheint. In beiden Fällen wird die Abhängigkeit vom verschmelzenden elektrischen Feld E_m angegeben. In dieser Arbeit konnte in Abhängigkeit vom Kp-Index für das Helligkeitsmaximum kein klarer Trend festgestellt werden. Die mittlere Verschiebung liegt für das Sonnenmaximum bei $(4,49 \pm 0,87)^\circ$ und für das Sonnenminimum bei $(4,97 \pm 0,77)^\circ$. Die Werte sind also innerhalb ihrer Fehler konsistent und decken sich mit dem zuvor angegebenen Intervall aus verschiedenen Quellen sowie der mittleren Verschiebung aus Xiong und Lühr [2014].

Da zur Rekonstruktion des Ovals auch historische Beobachtungen genutzt werden, war es notwendig, Polarlichtkataloge zu untersuchen, was in Abschnitt 3.1 genauer dargelegt wurde. Insgesamt konnten 35 Kataloge gefunden werden, die einen Zeitraum von 626 v. Chr. bis 1976 n. Chr. abdecken. Diese Kataloge enthalten, Dopplungen eingeschlossen, 114719 Aurorabeobachtungen. In vielen Fällen ist lediglich der Ort und das Datum der Beobachtung hinterlegt. Sind, wie für die Rekonstruktion, weitere Informationen notwendig, müssen die Originaltexte konsultiert werden. Dabei konnten 2496 Berichte ermittelt werden, wobei aus diesen alle erforderlichen Daten entnommen wurden, um die in Abschnitt 4.1 beschriebene Methode durchzuführen. Für die betrachteten historischen Stürme wurden weitere Originaltexte untersucht sowie Zeitungsartikel aus den entsprechenden Zeiten mit einbezogen. Im Falle der modernen Beobachtungen wurden, wie in Abschnitt 4.2 dargelegt, hauptsächlich Amateurfotografien der Polarlichter genutzt, um Informationen wie Datum, Uhrzeit, Azimut, Höhe und Farbe abzuleiten. Dazu wurden die Aufnahmen mit dem identischen Himmelsausschnitt in *Stellarium 0.16.1* [Zotti et al., 2017] verglichen und die Hintergrundsterne genutzt, um die Position des Polarlichts zu bestimmen.

Mit diesen Informationen konnte dann die Position und Ausdehnung des Polarlichtovals ermittelt werden (siehe Kapitel 4). Dazu wurde die Methode der Bayes-Inferenz genutzt, bei der die gesuchten Parameter, nämlich geografische Länge ϕ und Breite ϑ des CGM-Pols sowie Kp-Index, als Zufallsvariablen angesehen werden, die einer a-priori-Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung genügen. Mittels der Daten und einem Modell des Polarlichtovals kann dann die a-posteriori-Verteilung errechnet werden, aus der die ge-

suchten Parameter bestimmt werden können. Als Modell kann die Ausarbeitung von *Holzworth et al.* [1975] oder *Zhang und Paxton* [2008] genutzt werden. Beides sind empirische Modelle des Ovals, mit deren Hilfe die Position der polnahen und äquatornahen Grenze berechnet werden kann. Im vorliegenden Fall wurde die äquaturnahe Grenze genutzt, da für Beobachter in mittleren Breiten die Wahrscheinlichkeit höher ist, diesen Bereich des Polarlichtovals zu sehen. Anhand der Modelle konnte anschließend berechnet werden, in welcher Höhe ein Beobachter an einem gegebenen Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt das Polarlicht theoretisch hätte sehen müssen. Dieser Wert wurde mit der Höhe aus den Berichten verglichen. Nach der Berechnung ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die drei gesuchten Parameter.

Um das Verfahren zu testen, wurden zunächst künstliche Beobachtungen erstellt, für die die Position des CGM-Pols sowie der Kp-Index bekannt sind. Es konnte gezeigt werden, dass die verschiedenen Methoden für reale Beobachtungsverteilungen die vorgegebenen Parameter ermitteln konnte. Auch nach einer zufälligen Variation der beobachteten Polarlichthöhe innerhalb eines 10° -Intervalls konnten die vorgegebenen Werte wieder ermittelt werden. Die Unterschiede zwischen den Berechnungen mit und ohne Variation sind dabei vernachlässigbar.

Im Abschnitt 4.2 wurden moderne Geomagnetstürme aus den Jahren 2015 und 2003 genutzt, um die Methode weiter zu validieren. In diesen Fällen sind die Parameter aus direkten Messungen bekannt. 235 Polarlichtsichtungen konnten für den St. Patrick's Day-Sturm am 17. März 2015 ermittelt werden; alle erforderlichen Informationen fanden sich in 186 Beobachtungen. Dabei konnte eine mittlere Position des CGM-Pols von $(83,7 \pm 0,4)^\circ \text{N}$ und $(76,4 \pm 2,6)^\circ \text{W}$ ermittelt werden. Die Breite deckt sich dabei sehr gut mit der wahren Position des CGM-Pols bei $83,1^\circ \text{N}$ und $84,6^\circ \text{W}$. Lediglich die Länge weicht etwa 8° ab. Ursache hierfür könnte die in Abschnitt 4.1.1 präsentierte vereinfachte Koordinatentransformation sein. Dennoch beträgt der absolute Abstand beider Positionen aufgrund der hohen geografischen Breite nur $(123 \pm 6) \text{ km}$. Der berechnete Kp-Index liegt bei $K_p = 5,3 \pm 1,1$ und ist damit innerhalb von 2σ konsistent mit dem gemessenen Tagesmittel von 7–. Zur Feststellung der Fitgenauigkeit wurde die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSD) berechnet. Dabei zeigte sich, dass alle Methoden Werte in der gleichen Größenordnung liefern und somit keine Methode und kein Ovalmodell bevorzugt werden kann. Unter Nutzung der geomagnetisch äquatornächsten Polarlichtposition konnte zudem der Dst-Index abgeschätzt werden. Im vorliegenden Fall wurde dafür nur eine einfache Abschätzung genutzt, die die Berechnung des Feldlinienfußpunktes außer Acht lässt. Der so ermittelte Dst-Index liegt bei -269 nT , was nah am gemessenen Wert von $\text{Dst} = -223 \text{ nT}$ aus *Maurya et al.* [2018] liegt.

Für den Halloween-Sturm am 29. Oktober 2003 wurden 207 Beobachtungen identifiziert,

wobei für 128 Sichtungen alle erforderlichen Informationen ermittelt werden konnten. Die mittlere berechnete CGM-Polposition liegt bei $(76,2 \pm 2,5)^\circ$ N und $(59,9 \pm 7,5)^\circ$ W. Im Vergleich zum Sturm 2015 sind hier die Abweichung sowohl in der Breite als auch in der Länge größer (die wahre Position liegt bei $82,1^\circ$ N und $83,2^\circ$ W). Die Abweichung in der Breite beträgt etwa 6° , die in der Länge 23° . Beide Werte sind innerhalb des 1σ -Fehlers nicht konsistent. Daraus resultiert auch eine Abweichung im Kp-Index, der bei $4,2 \pm 0,6$ liegt, wohingegen das gemessene Tagesmittel mit $8+$ angegeben ist. Die RMSD-Werte zeigen allerdings keine deutlich schlechteren Fitgenauigkeiten als beim 2015-er Sturm. Zudem kann erneut keine Methode und kein Modell als bevorzugt angesehen werden. Die Ursachen für die Abweichung sind im Gegensatz zum Sturm 2015 in den ungenaueren Daten zu sehen. Die Qualität der Fotografien ist schlechter und die Bestimmung der Position der Aurora daher in weniger Fällen möglich. Die meisten vorliegenden Berichte haben eine größere Abweichung für die einzelnen Parameter, als jene, welche für den St. Patrick's Day-Sturm aus den Fotos ermittelt wurden. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Methode für eine gute Datenlage die wahre Position des CGM-Pols sowie den Kp-Index korrekt berechnen kann. Für weniger gute Daten hingegen kommt es zu Abweichungen. In solch einem Fall kann das Verfahren dahingehend eingeschränkt werden, dass lediglich der Kp-Index berechnet wird, wobei die Position des Pols aus verschiedenen Modellen vorgegeben wird. Beim Halloween-Sturm führt dieses Vorgehen zu einem mittleren Kp-Index von $8,2 \pm 0,6$. Dies deckt sich sehr genau mit dem gemessenen Tagesmittel. Der ermittelte Dst-Index liegt bei -599 nT (Vgl.: Dst = -400 nT [Pulkkinen et al., 2005]). Die Abweichung kommt durch die vereinfachte Berechnung zustande, weshalb der in dieser Arbeit ermittelte Dst-Index als untere Grenze angesehen werden kann.

Als erstes historisches Event wurde der wohl stärkste Geomagnetsturm der letzten 150 Jahre genutzt [Farrona et al., 2011]. Dabei handelt es sich um das Carrington-Event zwischen dem 28. August 1859 und dem 05. September 1859. Das Besondere war, dass Carrington [1860] im Voraus erstmals einen Weißlichtausbruch der Sonne beobachten konnte, womit der Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität und Polarlichtern klar wurde. Insgesamt konnten in den Polarlichtkatalogen sowie Zeitschriften 532 Beobachtungen ermittelt werden. Dabei enthalten 167 Sichtungen jeweils alle benötigten Informationen. Darunter befinden sich sieben Beobachtungen der Südhalbkugel, die zur Berechnung ausgeschlossen wurden. Die Verteilung der Polarlichthäufigkeit legt nahe, das Carrington-Event in zwei Stürme einzuteilen und diese getrennt voneinander zu untersuchen. Der erste Abschnitt liegt im August. Für diesen Zeitraum liegen 81 Beobachtungen vor. Der zweite Zeitraum vom 01. bis 05. September 1859 enthält 86 Beobachtungen mit allen erforderlichen Informationen. Nach dem *gufm1*-Modell [Jackson et al., 2000] lag der Geomagnetpol 1859

bei $79,3^\circ$ N und $80,5^\circ$ W. Diese Position kann als Vergleich mit dem hier berechneten CGM-Pol dienen. Für August ergab sich aus den Rechnungen eine mittlere Position des CGM-Pols von $(69,7 \pm 1,0)^\circ$ N und $(88,9 \pm 8,9)^\circ$ W. Für den September konnte eine Position von $(61,1 \pm 1,8)^\circ$ N und $(83,6 \pm 4,7)^\circ$ W bestimmt werden. In beiden Fällen stimmt die geografische Länge besser mit dem Referenzwert aus dem *gufm1*-Modell überein als die Breite, wobei insbesondere bei den Berechnungen im September die wahre Länge des Pols gut widerspiegelt wird. Die Breite weicht im August und im September um etwa 10° bzw. 18° ab. Der Grund hierfür ist in den verwendeten Ovalmodellen zu sehen, die für extreme Events wie den Carrington-Sturm die Größe des Ovals unterschätzen. Dies resultiert in einer geringeren Breite des berechneten Pols, was durch das Fehlen ostasiatischer Sichtungen mit allen erforderlichen Informationen begünstigt wird. Der berechnete mittlere Kp-Index liegt bei $8,4 \pm 0,3$ (August) und $7,4 \pm 0,7$ (September). In beiden Fällen wird also sehr hohe magnetische Aktivität erreicht, wobei die Beobachtungsverteilung suggeriert, dass die Stärke des September-Sturms die aus dem August übertrifft. Der geringere ermittelte Kp-Index im September lässt sich mit der niedrigen Breite des berechneten CGM-Pols erklären. Nach Einschränkung des Programms auf die ausschließliche Berechnung des Kp-Index, ergab sich im August ein Wert von $K_p = 8,2 \pm 0,3$, wohingegen der Kp-Index im September bei $8,7 \pm 0,2$ liegt. Wie erwartet zeigt sich auf diese Weise eine stärkere magnetische Aktivität im September. Dennoch sind beide Werte innerhalb der Fehler konsistent. Die RMSD-Werte beim Carrington-Event sind höher als bei den moderneren Stürmen. Das lässt darauf schließen, dass die rekonstruierten Ovale die wahre Beobachtungsverteilung beim Carrington-Event weniger gut widerspiegeln. Sowohl im August als auch im September zeigt sich zudem der Trend, dass das Modell nach *Holzworth et al.* [1975] geringere RMSD-Werte erzielt und somit zu einem genaueren Fit der Beobachtungsdaten führt. Anhand der geomagnetisch äquatornächsten Position ergab sich ein Dst-Index von -929 nT (August) und -1327 nT (September). Nach *Siscoe et al.* [2006] liegt der Dst-Index zwischen -850 nT und -1600 nT, was mit den hier ermittelten Werten konsistent ist.

Neben dem Carrington-Event wurden acht weitere historische Stürme untersucht. Hierbei wurde sich aufgrund der schlechteren Datenlage nur auf die Berechnung des Kp-Index beschränkt. Der Kp-Index liegt für die Stürme vom Februar 1730, 1770 und 1872 zwischen 9- bis 9 und damit am oberen Ende der Skala. Für Oktober 1730, 1737, 1847 und 1882 liegt der Kp-Index jeweils im Bereich von 8. Lediglich der Sturm von 1716 ist mit einem Kp-Index von $7,2 \pm 0,4$ etwas schwächer. Die Abschätzung des Dst-Index liefert ein ähnliches Bild. Auffällig sind hier die Stürme von 1770 und 1872, bei denen ein Dst-Index von -1880 nT bzw. -2422 nT ermittelt wurde. Der Grund für diese extremen Werte ist der

Tatsache geschuldet, dass Beobachtungen im Zenit angenommen wurden, wenn die erforderlichen Daten nicht verfügbar waren. Wird hingegen von einer Beobachtung nahe des Nordhorizonts ausgegangen, so verändern sich die Werte zu $Dst = -688 \text{ nT}$ (1770) und $Dst = -1301 \text{ nT}$ (1872). Zudem werden die Werte durch die vereinfachte Abschätzung sowie das Nichtbeachten des sich verändernden Dipolmomentes des Erdmagnetfeldes beeinflusst. Lediglich für drei der historischen Stürme war die Berechnung der Polposition anhand einer Methode erfolgreich. Für 1716 ergab sich ein CGM-Pol bei $(83,3 \pm 0,2)^\circ \text{ N}$ und $(52,3 \pm 24,5)^\circ \text{ W}$, wobei der Geomagnetpol nach dem *gufm1* bei $81,2^\circ \text{ N}$ und $49,1^\circ \text{ W}$ liegt. Die Abweichung, sowohl in der Breite als auch in der Länge liegt bei nur 2° bzw. 3° , wobei das Fehlerintervall der Länge sehr groß ist. Dies resultiert in einem absoluten Abstand von $(239 \pm 47) \text{ km}$. Für den Sturm im Oktober 1730 wurde eine Position des CGM-Pols von $(82,1 \pm 0,1)^\circ \text{ N}$ und $(80,9 \pm 10,3)^\circ \text{ W}$ ermittelt (*gufm1*: $80,7^\circ \text{ N}$, $52,9^\circ \text{ W}$), was einer Abweichung in der Breite von etwa $1,4^\circ$ und in der Länge von 28° entspricht. Innerhalb von 3σ sind die Werte dennoch miteinander konsistent (absoluter Abstand $(485 \pm 157) \text{ km}$). Die berechnete Polposition im Jahr 1847 liegt bei $(74,4 \pm 0,2)^\circ \text{ N}$ und $(50,0 \pm 0,9)^\circ \text{ W}$ (*gufm1*: $78,7^\circ \text{ N}$, $64,9^\circ \text{ W}$). Wie zuvor beträgt die Abweichung in der Breite nur 1° , in der Länge sind es hingegen 14° (absoluter Abstand: $(612 \pm 33) \text{ km}$).

Anhand der synthetischen Beobachtungen sowie des St. Patrick's Day-Sturms konnte gezeigt werden, dass das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren für eine gute Datenlage präzise die Position des CGM-Pols sowie den Kp-Index berechnen kann, wobei bereits im Falle des 2015 Sturms eine Abweichung in der Länge auftritt. Sind die Daten ungenauer, ist also die Position des Polarlichts weniger gut bestimmt, so treten vor allem in der geografischen Länge des CGM-Pols größere Abweichungen auf. Dies zeigt sowohl der Halloween-Sturm 2003 als auch die historischen Stürme mit Ausnahme des Carrington-Events. In all diesen Fällen konnte die geografische Breite des CGM-Pols sehr genau bestimmt werden, wohingegen es in der Länge Abweichungen im Bereich von $\sim 10^\circ$ geben kann. Auffällig beim Carrington-Event ist, dass hier außerdem eine Abweichung in der Breite auftritt. Dies kann mit der Unterschätzung der Ovalausdehnung innerhalb der verwendeten Modelle für extreme Stürme begründet werden. Die Modelle nach *Holzworth et al.* [1975] und *Zhang und Paxton* [2008] sind empirische Modelle. Da starke und extreme Stürme deutlich seltener auftreten, sind die Modelle insbesondere für diese Fälle weniger genau. Weitere Ungenauigkeiten kommen durch die vereinfachte Koordinatentransformation zwischen CGM- und geografischen Koordinaten zustande, wie sie in *Sigernes et al.* [2011] vorgestellt wird. Weiterhin wären Ungenauigkeiten durch das Zusammenlegen verschiedener Teilstürme denkbar, was jedoch ausgeschlossen werden konnte. Des Weiteren liefern beide Ovalmodelle, erneut aufgrund der zu kleinen Ovalausdehnung, für einige Be-

obachtungen kein Ergebnis, weshalb diese Beobachtungen entweder vernachlässigt werden müssen oder die Annahme getroffen werden muss, dass diese Beobachtungen in magnetischer Nordrichtung erfolgten. Eine weitere Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, ist die Berechnung der Polarlichtposition aus den Informationen der Berichte bzw. Fotografien. Diese kann anschließend mit der nächstgelegenen Ovalposition verglichen werden. Dieser Ansatz liefert für alle Beobachtungen eine Lösung. Allerdings ist hier eine Manipulation der Daten in Form der Berechnung der Auroraposition notwendig. Wird wie zuvor die theoretische mit der wahren Höhe des Polarlichts verglichen, so kann direkt die Information aus den Berichten genutzt werden.

Aus den verschiedenen in Tabelle 4.1 vorgestellten Methoden liefert in den meisten Fällen Methode 3 Ergebnisse, die am besten mit der wahren Position des Pols übereinstimmen. Hier wird das Modell nach *Holzworth et al.* [1975] verwendet und Beobachtungen, für die keine Lösung ermittelt werden konnte, ignoriert. Dennoch können auch mit den anderen Ansätzen unter Umständen bessere Ergebnisse erzielt werden, sodass nicht final abgeschätzt werden kann, welche der acht Methoden die genaueste ist. Das gleiche Verhalten zeigt sich in der Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSD). Für den St. Patrick's Day-Sturm sowie den Halloween-Sturm sind die RMSD-Werte für beide Ovalmodelle in einem ähnlichen Größenbereich. Lediglich im Fall des Carrington-Events zeigen sich leichte Abweichung mit der Tendenz, dass das Holzworth-Modell die Beobachtungsverteilung besser beschreibt. Allgemein sind die RMSD-Werte für das Carrington-Event größer als für die Stürme von 2003 und 2015, was bedeutet, dass beide Ovalmodelle diesen extremen Sturm weniger gut beschreiben. Mit der Bayes-Statistik wäre ein direkter Vergleich der Modelle nach *Holzworth et al.* [1975] und *Zhang und Paxton* [2008] möglich. Dazu müsste die a-posteriori-Verteilung beider Modelle für die jeweiligen Stürme miteinander verglichen werden. Da die Markov-Ketten-Monte-Carlo-Simulation allerdings nur bestimmte Bereiche des Parameterraums abläuft, ist das Gesamtintegral unbekannt und ein Modellvergleich mit der hier vorgestellten Implementation des Bayes-Statistik nicht möglich. Dies kann jedoch in weiteren Schritten ermöglicht werden.

Zukünftige Projekte

Die synthetischen Beobachtungen wie auch der St. Patrick's Day-Sturm 2015 haben gezeigt, dass das Verfahren gute Ergebnisse liefert, solange die eingehenden Daten ausreichend präzise Angaben über die Beobachtungszeit, den Standort und die Position der Aurora am Himmel machen. Die folgenden Schritte sollten sich also damit befassen, weitere Beobachtungen und Originalquellen der historischen Stürme zu suchen und zu analysieren, um die erforderlichen Daten zu extrahieren. Anschließend kann die Metho-

de auch hier genauere Ergebnisse liefern und eine Beschränkung auf die Berechnung des Kp-Index ist nicht vonnöten. Außerdem können weitere historische Stürme untersucht werden, um die Zeitreihe des Kp-Index weiter in die Vergangenheit auszuweiten. Dies würde zu einem besseren Verständnis der Sonnenaktivität führen, da der Kp-Index von der Sonnenaktivität moduliert wird. Die berechnete Lage der CGM-Pole kann verwendet werden, um paläomagnetische Feldmodelle zu validieren.

Des Weiteren kann die Möglichkeit des Modellvergleichs implementiert werden. Dabei kann bestimmt werden, welches der beiden Modelle (Holzworth-Modell oder ZP-Modell) die jeweilige Beobachtungsverteilung besser beschreibt. Zudem könnten andere Aurora-ovalmodelle wie das CH-Aurora-2014-Modell verwendet werden, auch wenn in diesem Fall das verschmelzende elektrische Feld E_m und nicht der Kp-Index ermittelt werden würde. Um die Berechnung weiter zu verbessern, können zudem Informationen wie die Farbe der Polarlichter verwendet werden. Die verschiedenen Farben können dazu genutzt werden, die wahrscheinlichste absolute Höhe der Aurora einzugrenzen, wobei allerdings nur geringe Effekte erwartet werden. Es wäre zudem möglich, anhand der Berichte den in die Berechnung eingehenden Positionsfehler für jede Beobachtung einzeln festzulegen, wodurch eine Fehlerüber- und Fehlerunterschätzung im einzelnen Fall minimiert werden kann. Hierfür sind allerdings genügend exakte Berichte notwendig, die eine sinnvolle Fehlerabschätzung erlauben.

Der erstellte Polarlichtkatalog kann genutzt werden, um weitere Informationen über starke Geomagnetstürme und die globale Verteilung der Beobachtungen abzuleiten. Anhand der Sichtungen kann der Dst-Index genauer abgeschätzt werden als dies bisher erfolgt ist.

In dieser Arbeit wurde erstmals das globale Polarlichtoval mit bodengebundenen Beobachtungen rekonstruiert. Die erzielten Ergebnisse sind, für eine ausreichend gute Datenlage, in guter Übereinstimmung mit direkten Messungen sowie Resultaten aus terrestrischen Magnetfeldmodellen. Weiterhin konnte ein Polarlichtkatalog erstellt werden, mit dessen Hilfe das hier beschriebene Verfahren auf historische Geomagnetstürme ausgeweitet werden konnte. Die Ergebnisse helfen sowohl die Variation der Sonnenaktivität als auch des Erdmagnetfeldes zu verstehen, wodurch diese Arbeit als weiterer kleiner Schritt im Verständnis der Sonne-Erde-Wechselwirkung gesehen werden kann. Daran wird ersichtlich, dass historische Überlieferungen eine Vielzahl an Informationen bereithalten, die auch Fortschritte in der modernen Wissenschaft ermöglichen.

Anhang A

Weiterführende Informationen zu Magnetfeldmodellen, magnetischen Indizes sowie Geomagnetstürmen

TABELLE A.1: Übersicht über verschiedene Feldmodelle. AM: Archäomagnetische und Vulkan daten, LS: Sedimentdaten mit Orientierung, RPI: Sedimentdaten mit relativer Intensität.

Modell	Zeitraum	Datentyp	Anzahl Daten	Referenz
A_FM	–1000 bis 2000	AM	9660	<i>Licht et al.</i> [2013]
ARCH3k.1	–1000 bis 1990	AM	9605	<i>Korte et al.</i> [2009]
ASDI_FM	–1000 bis 2000	AM, LS, RPI	34020	<i>Licht et al.</i> [2013]
CALS10k.2	–8000 bis 1990	AM, LS, RPI	77075	<i>Constable et al.</i> [2016]
HFM.OL1.A1	–8000 bis 1990	AM, LS, RPI	79722	<i>Constable et al.</i> [2016]
pfm9k.1a	–7000 bis 1990	AM, LS, RPI	29422	<i>Nilsson et al.</i> [2014]

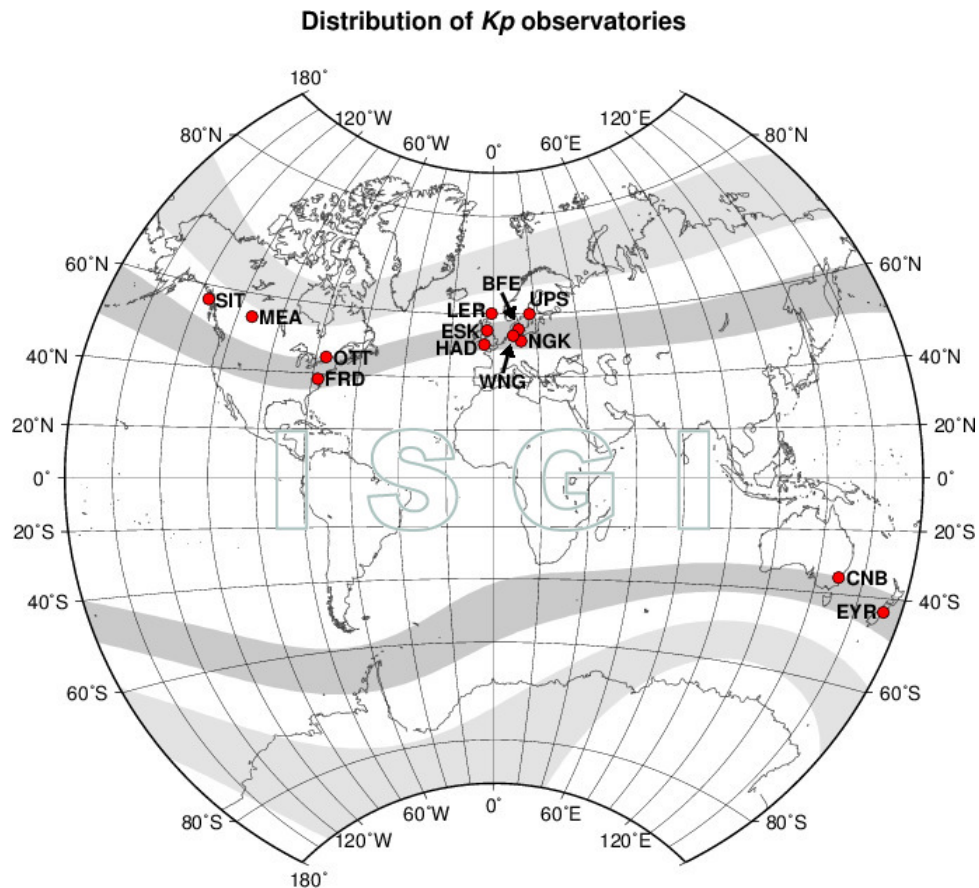


ABBILDUNG A.1: Übersicht über die globale Verteilung der 13 magnetischen Observatorien, aus deren K_s -Indizes der K_p -Index berechnet wird. Ursprünglich gab es lediglich elf Observatorien, weshalb auch heute noch zunächst die K_s -Werte von Brorfelde (BFE) und Uppsala (UPS) sowie Eyrewell (EYR) und Canberra (CNB) gemittelt werden, bevor der eigentliche K_p -Index berechnet wird (http://isgi.unistra.fr/indices_kp.php).

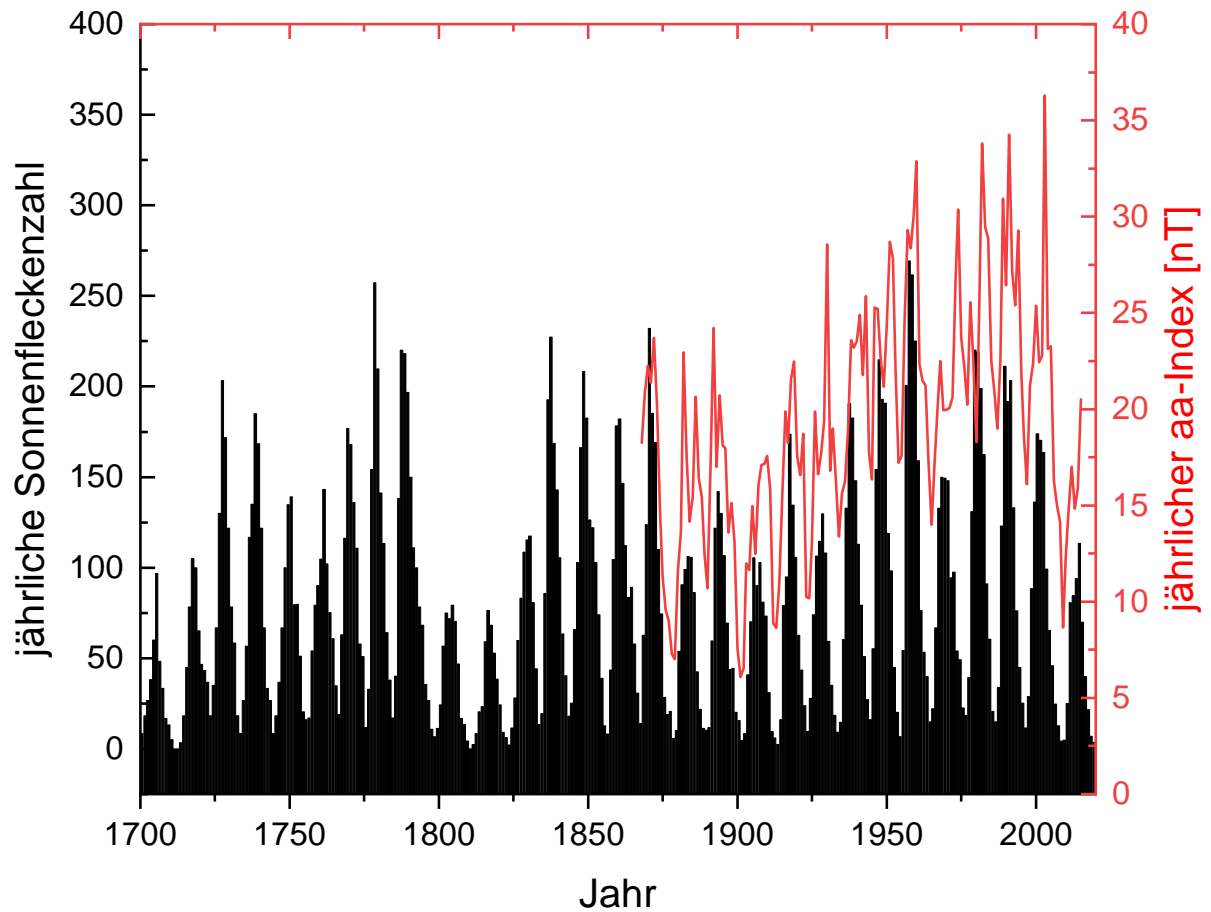


ABBILDUNG A.2: Vergleich zwischen mittlerer jährlicher Sonnenfleckenanzahl und dem mittleren jährlichen aa-Index. Wie in den Sonnenfleckenzahlen kann auch anhand des aa-Index der Schwabezyklus abgeleitet werden.

Kategorie	Effekte	Kp-index	Häufigkeit
G5 (extrem)	Stromversorgung: weitreichende Probleme die Spannung zu kontrollieren, mögliche Komplettausfälle. Transformatoren können Schaden nehmen. Satelliten: starke Oberflächenladungen möglich, Probleme mit Orientierung sowie download und upload. andere Systeme: hochfrequente Radioübertragung für Tage gestört, niederfrequente Übertragung für Stunden, keine Satellitennavigation, Polarlichter bis 40° geomagn. Breite.	Kp = 9	4 pro Zyklus
G4 (schwer)	Stromversorgung: möglicherweise weitreichende Probleme die Spannung zu kontrollieren. Satelliten: möglicherweise starke Oberflächenladungen sowie Probleme mit Orientierung. andere Systeme: hochfrequente und niederfrequente Radioübertragung teilweise gestört, keine Satellitennavigation für Stunden, Polarlichter bis 45° geomagn. Breite.	Kp = 8	100 pro Zyklus
G3 (stark)	Stromversorgung: Korrekturen der Spannung erforderlich, falscher Alarm an Überspannungsschutz. Satelliten: möglicherweise Oberflächenladungen sowie Probleme mit Orientierung. In Orbits nahe der Erde erhöhter Widerstand. andere Systeme: hochfrequente Radioübertragung teilweise gestört, niederfrequente sowie Satellitennavigation zeitweise gestört, Polarlichter bis 50° geomagn. Breite.	Kp = 7	200 pro Zyklus
G2 (moderat)	Stromversorgung: Schaden an Systemen bei hohen Breiten. Lange Stürme können Transformatoren beschädigen. Satelliten: Orientierung muss vom Boden aus korrigiert werden. andere Systeme: hochfrequente Radioübertragung in hohen Breiten gestört, Polarlichter bis 55° geomagn. Breite.	Kp = 6	600 pro Zyklus
G1 (schwach)	Stromversorgung: Schwache Spannungsschwankungen. Satelliten: Nur geringer Einfluss auf Satelliten. andere Systeme: Zugvögel in hohen Breiten können gestört werden, Polarlichter in hohen Breiten.	Kp = 5	1700 pro Zyklus

ABBILDUNG A.3: NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Einteilung der Stärke geomagnetischer Stürme. Zu sehen sind die Auswirkungen auf verschiedene Bereiche wie die Spannungsversorgung sowie die Häufigkeit pro elfjährigem Sonnenzyklus.

Anhang B

Verwendete Satellitenbeobachtungen und Ergebnisse

TABELLE B.1: Verschiebung und Radius zusammen mit den 1σ -Fehlern für neun verschiedene Kp-Indizes während des Sonnenmaximums (1981 und 1982) (oben) und für sieben verschiedene Kp-Indizes während des Sonnenminimums (1986 und 1987) (unten). Die Doppelpunkte kennzeichnen unsicherere Werte.

Kp-Index	Verschiebung [°]	Verschiebungsfehler [°]	Radius [°]	Radius Fehler [°]
1	3,16	1,05	16,70	0,68
2	5,43	2,12	17,93	1,46
3	5,01	1,86	19,55	2,21
4	4,13	1,81	22,13	1,55
5–	5,07	1,61	23,96	1,30
6	3,57	1,21	24,27	1,95
7	5,07	1,81	27,97	2,12
8–	2,79:	1,40:	24,46:	0,99:
9	8,67:	1,30:	26,86:	2,39:
1	4,71	0,73	16,77	0,95
2	5,14	1,08	17,95	1,12
3	4,88	1,29	18,87	1,63
4	4,92	1,50	21,01	1,60
5–	4,60	0,67	22,43	1,18
6	6,51	2,04	23,93	1,43
7+	4,01	1,26	24,94	0,99

TABELLE B.2: Datum, Zeit und Anzahl der analysierten Aufnahmen des DE1 im Sonnenmaximum für neun verschiedene Kp-Indizes zwischen 1 und 9. Insgesamt wurden 244 Aufnahmen untersucht.

Kp-Index	Datum	Zeit [UT]	# Aufnahmen	Gesamtanzahl
1	28.11.1981	03:00 - 09:00	9	18
1	21.12.1981	03:00 - 09:00	9	
2	06.01.1982	12:00 - 18:00	16	42
2	24.03.1982	03:00 - 09:00	10	
2	12.05.1982	03:00 - 09:00	4	
2	24.10.1982	15:00 - 21:00	12	
3	18.12.1981	03:00 - 12:00	3	48
3	07.01.1982	12:00 - 21:00	27	
3	31.03.1982	06:00 - 15:00	18	
4	19.10.1981	06:00 - 12:00	19	26
4	22.10.1981	03:00 - 09:00	7	
5–	14.11.1981	12:00 - 18:00	18	30
5–	17.11.1981	15:00 - 21:00	12	
6	05.02.1982	00:00 - 06:00	9	35
6	22.03.1982	00:00 - 03:00	5	
6	25.04.1982	03:00 - 06:00	4	
6	28.05.1982	12:00 - 15:00	1	
6	14.07.1982	21:00 - 24:00	8	
6	16.07.1982	09:00 - 12:00	8	
7	10.10.1981	15:00 - 21:00	16	25
7	14.07.1982	09:00 - 12:00	9	
8–	7.08.1982	03:00 - 06:00	4	14
8–	22.09.1982	00:00 - 03:00	10	
9	13.07.1982	21:00 - 24:00	6	6

TABELLE B.3: Datum, Zeit und Anzahl der analysierten Aufnahmen des DE1 im Sonnenminimum für sieben verschiedene Kp-Indizes zwischen 1 und 7+. Insgesamt wurden 220 Aufnahmen untersucht.

Kp-Index	Datum	Zeit [UT]	# Aufnahmen	Gesamtanzahl
1	14.01.1986	15:00 - 21:00	9	35
1	14.04.1986	06:00 - 15:00	10	
1	23.06.1986	06:00 - 15:00	16	
2	31.01.1986	09:00 - 15:00	12	36
2	26.03.1986	03:00 - 09:00	11	
2	02.04.1986	03:00 - 09:00	3	
2	28.04.1986	12:00 - 18:00	10	
3	23.01.1986	06:00 - 12:00	4	39
3	25.02.1986	12:00 - 18:00	8	
3	08.03.1986	06:00 - 15:00	11	
3	24.03.1986	00:00 - 06:00	9	
3	27.05.1986	09:00 - 15:00	7	
4	28.01.1986	18:00 - 24:00	6	33
4	22.02.1986	09:00 - 15:00	10	
4	10.04.1986	03:00 - 09:00	10	
4	26.09.1986	12:00 - 18:00	7	
5–	27.06.1986	15:00 - 21:00	16	24
5–	14.10.1986	06:00 - 12:00	4	
5–	27.10.1987	15:00 - 21:00	4	
6	03.05.1986	03:00 - 06:00	5	30
6	25.09.1987	15:00 - 18:00	10	
6	30.09.1987	03:00 - 06:00	9	
6	03.10.1987	12:00 - 15:00	6	
7+	03.05.1986	00:00 - 03:00	23	23

Anhang C

Informationen zur Berechnung des theoretischen Polarlichtovals

TABELLE C.1: Koeffizienten zur Berechnung des AL-Index aus dem Kp-Index.

c₀	c₁	c₂	c₃
18	-12,3	27,2	-2,0

TABELLE C.2: Koeffizienten zur Berechnung der A_i und α_j .

	A₀	A₁	A₂	A₃	α₁	α₂	α₃
b ₀	1,61	-9,59	-12,07	-6,56	-2,22	-23,98	-20,07
b ₁	23,21	17,78	17,49	11,44	1,50	42,79	36,67
b ₂	-10,97	-7,20	-7,96	-6,73	-0,58	-26,96	-24,20
b ₃	2,03	0,96	1,15	1,13	0,08	5,56	5,11

TABELLE C.3: Koeffizienten zur Berechnung der maximalen Energie des Elektronenflusses Q_{\max} .

Kp	d₀	d₁	d₂	d₃	d₄
$Kp \leq 7$	1,400	-0,190	0,830	-0,210	0,018
$7 < Kp \leq 9$	24,710	8,730	-3,080	0,225	0,000

TABELLE C.4: Koeffizienten a_{kj} und b_{kj} zur Berechnung der Koeffizienten A_{ij} .

	A_{00}	A_{10}	A_{20}	A_{30}
$k_0 = 0,75$				
a_{00}	3,2402978	18,221647	2,8442195	1,833681
a_{10}	1,3291109	6,0779378	0,2931214	-0,3873319
a_{20}	0,4209809	-1,3235271	-0,5383766	0,009455
a_{30}	0,4779546	0,2553541	0,2728634	0,0548413
a_{40}	-0,3673774	0,0980007	0,2950094	-0,0113930
a_{50}	0,0557991	0,0075817	-0,0456968	-0,0434681
a_{60}	-0,0556684	-0,0050137	0,0073026	0,0562728
b_{10}	-0,1914775	1,3812608	0,813363	0,1214365
b_{20}	0,08027	-0,0211661	-0,3734801	-0,2901524
b_{30}	-0,4206442	-0,1240047	-0,0874247	0,0874247
b_{40}	-0,0354484	0,341596	-0,0607254	-0,1764180
b_{50}	-0,201748	-0,1074103	0,1679693	0,0400522
b_{60}	-0,0298214	0,2863931	-0,0456554	-0,1214534
$k_1 = 2,25$				
a_{00}	6,3011691	19,88241	2,9663179	1,8560835
a_{10}	3,2522103	6,5577617	0,8165399	-0,3102606
a_{20}	-0,2114976	-1,5086115	-0,3559603	0,0363061
a_{30}	0,3216365	0,545794	0,3101074	0,0574751
a_{40}	-0,32369	-0,0926016	0,0969373	-0,0304515
a_{50}	0,1705425	-0,0363445	-0,0530104	0,0657831
a_{60}	0,091987	-0,0801630	-0,0685254	0,0046886
b_{10}	-0,6934043	1,615614	0,7957589	-0,0660346
b_{20}	-0,1779372	-0,0385058	-0,4427029	-0,3614867
b_{30}	-0,3675894	-0,1844160	-0,1514768	0,1820734
b_{40}	-0,0095432	0,2427321	0,0079244	-0,1546944
b_{50}	-0,2508516	-0,1503851	0,1311359	0,0449006
b_{60}	-0,0501051	0,1889811	-0,0278058	-0,0735363
$k_2 = 3,75$				
a_{00}	9,5988037	21,479304	3,1926672	1,9755171
a_{10}	5,1430543	6,607545	1,2270596	-0,3518031
a_{20}	-1,7371661	-1,2566572	-0,0054540	-0,0143734
a_{30}	-0,2230598	0,3451542	0,1229414	-0,0291659

a ₄₀	0,0422935	-0,05647	0,0573293	-0,0337693
a ₅₀	-0,0122696	-0,1576626	-0,0562889	0,0388444
a ₆₀	0,008051	0,2253359	0,095604	0,0575712
b ₁₀	-0,6726416	1,2164832	0,4361579	-0,1477385
b ₂₀	-0,0727642	-0,2300587	-0,5028849	-0,2390160
b ₃₀	0,1200389	-0,3520732	-0,2906078	0,1048181
b ₄₀	0,0465696	0,2226716	0,051408	-0,1010366
b ₅₀	-0,4557674	-0,0385575	0,0760109	-0,0255308
b ₆₀	-0,1550104	0,13106	0,0308203	-0,0628866
<hr/>				
k₃ = 5,25				
a ₀₀	12,246801	23,511121	3,7091436	2,1764069
a ₁₀	7,0481969	6,1681312	1,3842879	-0,4713056
a ₂₀	-3,0928509	-0,7124293	0,1899543	-0,0948302
a ₃₀	-1,2935699	0,2640897	0,0647574	-0,1372124
a ₄₀	0,0884275	-0,2602568	-0,0045988	-0,0509513
a ₅₀	-0,0274394	0,02115	0,0295777	0,0340843
a ₆₀	-0,272369	0,226095	0,1237925	-0,0056936
b ₁₀	-1,0729358	1,043448	0,4866616	-0,2832799
b ₂₀	0,1829594	-0,3088645	-0,4396647	-0,0853116
b ₃₀	0,6604424	-0,6493409	-0,3368631	0,0876408
b ₄₀	0,1005881	0,3886247	0,2038886	0,07081
b ₅₀	-0,3857214	-0,0406112	0,0022551	-0,0345108
b ₆₀	-0,3237388	-0,0072146	0,0360084	-0,0328183
<hr/>				
k₄ = 7,00				
a ₀₀	17,185531	27,197799	5,1669995	2,5417068
a ₁₀	11,323595	5,3379375	1,1495666	-0,6063337
a ₂₀	-1,2885997	-1,1071272	0,0676676	0,0136708
a ₃₀	-0,8853908	0,3888829	-0,13391	-0,0624044
a ₄₀	1,2169522	-0,4494379	-0,0978956	0,0024086
a ₅₀	0,9936972	-0,2346430	-0,2247035	0,0623906
a ₆₀	0,3355213	0,3541175	0,0702655	0,0125311
b ₁₀	-1,8969096	-0,7900455	0,0107553	-0,307588
b ₂₀	-1,5002061	0,5940236	0,2318213	0,0774584
b ₃₀	-0,4722835	-0,7037725	-0,1692764	-0,1040405
b ₄₀	-1,874663	0,4504852	0,5258857	-0,0402230

b_{50}	-0,8323257	0,2860252	0,1850265	-0,0989170
b_{60}	0,1062067	-0,4846608	-0,2689677	0,0636382
<hr/>				
$k_5 = 9,00$				
a_{00}	33,43544	30,688625	5,9308809	4,1004123
a_{10}	24,269584	3,9275374	0,3238901	-0,4237273
a_{20}	-4,0539849	-2,4440639	-0,9602533	-0,1556447
a_{30}	-5,0305214	1,8123949	0,2338884	0,2188714
a_{40}	-1,7500538	-0,2253542	0,4168486	-0,0093918
a_{50}	-0,8196342	0,404406	-0,1198387	-0,0095218
a_{60}	-0,7520601	-1,2894243	-0,5288058	0,089657
b_{10}	-5,9059449	-2,6264976	0,8511741	-0,6852183
b_{20}	-0,1670781	3,0068989	0,9358651	-0,0488459
b_{30}	2,8623939	-2,5030701	-1,2186771	0,3298003
b_{40}	0,9153974	0,7056867	0,1745191	0,1314771
b_{50}	1,5992821	-0,1550183	-0,3299605	-0,1826762
b_{60}	0,9162504	-0,7857376	-0,2456667	0,2985601

Anhang D

Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

TABELLE D.1: Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge. Neben den Orten ist auch der Zeitraum gegeben, der im jeweiligen Katalog abgedeckt wird. Des Weiteren zeigt Spalte 4 die Anzahl der Sichtungen. Die letzte Spalte gibt Auskunft darüber, ob die einzelnen Berichte vorliegen. Insgesamt ergeben sich so 114719 Polarlichtsichtungen, wobei hier noch Dopplungen inbegriffen sind. Für 2496 Beobachtungen stehen die Berichte zur Verfügung. Die mit * gekennzeichneten Kataloge wurden von https://spdf.sci.gsfc.nasa.gov/pub/data/aaa_special-purpose-datasets/aaa_historical_aurora/ (abgerufen am: 17.04.2018) bezogen. Die in Klammern geschriebenen Jahreszahlen geben an, dass im jeweiligen Fall die Berichte nur ab diesem Jahr untersucht wurden.

Quelle/Autor	Ort	Zeitintervall	# Beob	Berichte
<i>Angot</i> [1897]	Europe	1704 – 1890	6288	nein
Canadian weather*	Kanada	1880 – 1928	10501	nein
US weather*	USA	1914 – 1948	6863	nein
<i>Barnard</i> [1902]	Yerkes Observatory	1897 – 1902	54	ja
<i>Barnard</i> [1910]	Yerkes Observatory	1902 – 1909	145	ja
<i>Basurah</i> [2004]	Süd Arabien	816 – 1449	4	ja
<i>Tromholt</i> [1902]	Norwegen	1594 – 1878	10654	nein
<i>Stetson und Brooks</i> [1942]	Blue Hill Observatory	1885 – 1940	282	nein
<i>Bond et al.</i> [1898]	Harvard College Observatory	1840 – 1888	954	ja
<i>Broughton</i> [2002]	Großbritannien	1769 – 1821	53	nein
<i>Krivsky und Pejml</i> [1988a]	weltweit	1000 – 1900	6291	nein
<i>Dalton</i> [1834]	Kendal, Keswick	1786 – 1793	250	einige
<i>Lassen et al.</i> [1963]	Dänemark	1960 – 1966	163	nein
<i>Fritz</i> [1873]	weltweit	503 v. Chr. – 1872	20916	nein
<i>Geddes</i> [1940]	Australien	1931 – 1938	373	nein
<i>Greely</i> [1881]	USA	1873 – 1879	5167	nein
Greenland Aurora*	Grönland	1840 – 1967	26110	nein
<i>Harrison</i> [2005]	Zentraleuropa	1771 – 1805	71	nein
<i>Vaquero et al.</i> [2003]	Iberische Halbinsel	1701 – 1848	37	ja
Iceland Aurora*	Island	1920 – 1923	737	nein
<i>Kassner</i> [1770]	Berlin	1707 – 1770	200	nein
<i>Krivsky und Pejml</i> [1988b]	Böhmen	1416 – 1914	99	ja
<i>Lee et al.</i> [2004]	Korea	992 – 1779	788	nein
<i>Link</i> [1962]	Europa	626 v. Chr. – 1697	594	nein
<i>Lovering</i> [1868a]	weltweit	–	-	nein
<i>Lovering</i> [1868b]	Cambridge	1838 – 1868	57	ja
<i>Lowe</i> [1870]	Großbritannien und Irland	555 – 1751	79	ja
<i>Matsushita</i> [1956]	Japan	620 – 1909	59	ja
<i>Rethly und Berkes</i> [1963]	Ungarn	452 (1806) – 1960	303	ja
<i>Rubenson</i> [1882]	Schweden	1536 – 1877	14591	nein
<i>Schroeder</i> [1979]	USA und Europa	1642 – 1717	-	nein
<i>Seydl</i> [1954]	Osteuropa	1600 – 1951	341	ja
<i>Visser</i> [1942]	Niederlande	1728 – 1940	1186	nein
<i>Willis et al.</i> [2007]	Japan und China	1844 – 1909	44	ja
<i>Yau et al.</i> [1995]	Japan, China, Korea	163 v. Chr. (1601) – 1770	465	ja
Gesamt			114719	2496

TABELLE D.2: Ergebnisse anhand synthetischer Beobachtungen mit zusätzlicher Variation der Polarlichthöhe in einem 10° -Intervall. Weiß hinterlegt sind die Berechnungen mittels des Holzworth-Modells, wobei die grau hinterlegten Zeilen die Ergebnisse unter Verwendung des ZP-Modells anzeigen. Die obere Tabelle zeigt die Resultate aller 40 generierten Beobachtungen. Die untere Tabelle beinhaltet die erzielten Ergebnisse beim vernachlässigen der ostasiatischen Sichtungen. Die vorgegebene Position des CGM-Pols liegt bei $83,1^\circ$ N und $84,0^\circ$ W, wobei ein Kp-Index von 6 gewählt wurde.

Nr.	Ansatz	geogr. Breite [$^\circ$]	geogr. Länge [$^\circ$]	Kp-Index	RMSD
1	A	$82,9 \pm 0,1$	$-87,5 \pm 3,8$	$5,3 \pm 0,5$	4,25
2	A	$83,2 \pm 0,1$	$-82,9 \pm 3,3$	$6,0 \pm 0,4$	3,17
3	A	$83,2 \pm 0,1$	$-83,0 \pm 3,7$	$6,1 \pm 0,5$	3,08
4	B	$83,4 \pm 0,1$	$-87,7 \pm 9,1$	$5,0 \pm 0,9$	$3,7 \cdot 10^5$
5	A	$82,9 \pm 0,1$	$-89,0 \pm 1,7$	$5,9 \pm 0,1$	5,50
6	A	$83,1 \pm 0,1$	$-84,6 \pm 2,2$	$5,9 \pm 0,1$	3,34
7	A	$82,9 \pm 0,1$	$-83,7 \pm 3,0$	$6,0 \pm 0,1$	3,12
8	B	$83,5 \pm 0,1$	$-86,6 \pm 9,0$	$5,9 \pm 0,3$	$2,9 \cdot 10^5$
Nr.	Ansatz	geogr. Breite [$^\circ$]	geogr. Länge [$^\circ$]	Kp-Index	RMSD
1	A	$83,0 \pm 0,1$	$-87,7 \pm 3,8$	$5,4 \pm 0,5$	5,24
2	A	$83,2 \pm 0,1$	$-83,1 \pm 3,5$	$6,0 \pm 0,5$	3,03
3	A	$83,2 \pm 0,1$	$-83,3 \pm 3,8$	$6,1 \pm 0,6$	2,87
4	B	$83,3 \pm 0,3$	$-98,0 \pm 27,5$	$5,9 \pm 2,0$	$3,9 \cdot 10^5$
5	A	$84,0 \pm 0,1$	$-91,7 \pm 4,3$	$6,3 \pm 0,3$	5,26
6	A	$83,4 \pm 0,1$	$-86,5 \pm 4,1$	$6,0 \pm 0,2$	3,27
7	A	$82,7 \pm 0,1$	$-83,9 \pm 6,2$	$6,0 \pm 0,2$	3,66
8	B	$83,6 \pm 0,2$	$-91,2 \pm 14,7$	$6,0 \pm 0,5$	$3,0 \cdot 10^5$

TABELLE D.3: Auflistung der 186 genutzten Sichtungen des St. Patrick's Day-Sturms am 17. und 18.03.2015. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, ST: Zeit nach Stellarium, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, b: blau

Nr.	Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	ST [LT]	az [°]	\bar{az} [°]	h [°]	\bar{h} [°]	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Farbe
1	17	-	-	23:30	289 - 46	347,5	9 - 59	34,5	Ellund (GER)	54,770	9,308	g, cr, bl
2	17	19:56	03:56	-	311 - 22	346,5	16 - 44	30	Juliusruh (GER)	54,621	13,372	g, r
3	17	21:00	3:30	-	339 - 58	18,5	6 - 42	24	Stohl, Dänischenhagen (GER)	54,471	10,147	g, y, r, cr
4	17	-	-	00:20	317 - 35	356	7 - 46	26,5	Leuchtturm Bülk (GER)	54,455	10,197	r, g, w
5	17	-	-	00:20	359 - 37	19	9 - 33	21,5	Laboe (GER)	54,402	10,224	r, g, cr
6	17	20:45	23:10	-	303 - 8	335,5	6 - 27	16,5	Kembs (GER)	54,348	10,917	g, cr
7	17	22:00	-	-	282 - 349	315,5	16 - 43	29,5	Hohwacht (GER)	54,324	10,668	g, cr
8	17	00:06	-	-	335 - 29	352	6 - 35	20,5	Stralsund (GER)	54,309	13,088	g, bl, cr
9	17	-	-	20:30	336 - 67	23	4 - 44	24	Nordvorpommern (GER)	54,22	12,83	g, r, cr
10	17	21:16	21:46	-	278 - 354	316	16 - 53	34,5	Helgoland (GER)	54,181	7,889	g, r, cr
11	17	21:00	23:00	-	265 - 80	352,5	10 - 54	32	Malente (GER)	54,173	10,559	g, r
12	17	20:00	01:20	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Loissin (GER)	54,112	13,528	g, w, r
13	17	21:15	-	-	312 - 26	349	17 - 38	27,5	Friedrichskoog (GER)	54,014	8,898	r, cr
14	17	22:00	-	-	342 - 32	7,5	5 - 31	18	Pariner Berg (GER)	53,947	10,679	y, g, r
15	17	23:45	00:02	-	285 - 67	356	15 - 61	38	Groß Parin (GER)	53,939	10,697	g, r
16	17	-	-	23:30	281 - 75	357,5	0 - 52	26	Hartenholm (GER)	53,900	10,060	g, w, r
17	17	21:00	23:00	-	331 - 80	25,5	8 - 54	31	Seth (GER)	53,847	10,145	g, r, cr
18	17	21:00	-	-	253 - 27	320	4 - 49	26,5	Klein Trebbow (GER)	53,711	11,372	g, r, cr
19	17	23:55	00:20	23:45	349 - 43	16	9 - 29	19	Mölln (GER)	53,620	10,689	g, r
20	17	19:45	00:00	-	318 - 69	13,5	9 - 44	26,5	Insrum (GER)	53,612	8,537	g, pi
21	17	21:00	-	-	340 - 52	17	9 - 37	23	Hamburg (GER)	53,551	9,994	g, r, cr
22	17	20:59	00:51	-	305 - 61	1,5	7 - 49	28	Buchholz, Nordheide (GER)	53,317	9,867	g, y, r
23	17	19:53	00:45	-	301 - 15	338	10 - 42	21,5	Oldenburg (GER)	53,144	8,211	g, pi
24	17	-	-	21:00	330 - 40	5	8 - 43	25,5	Krelingen (GER)	52,803	9,659	y, r, pi
25	17	-	-	21:30	327 - 37	2	16 - 41	28,5	Sulingen (GER)	52,683	8,811	pi
26	17	-	-	20:15	300 - 39	349,5	8 - 30	19	Berlin (GER)	52,519	13,405	g, pi
27	17	23:45	-	21:15	316 - 54	5	5 - 42	23,5	Arpke (GER)	52,388	10,097	g, r, pi
28	17	20:00	21:30	21:00	297 - 11	334	7 - 33	20	Fürstenwalde (GER)	52,369	14,067	g, r, pi
29	17	-	-	21:30	318 - 41	359,5	10 - 36	23	Rheine (GER)	52,282	7,443	r, cr
30	17	-	-	21:00	290 - 359	324,5	11 - 37	24	Osnabrück (GER)	52,280	8,047	g, r
31	17	21:01	-	21:00	309 - 21	345	15 - 31	23	Osnabrück (GER)	52,280	8,047	pi
32	17	23:50	00:20	23:00	327 - 40	3,5	10 - 41	25,5	Bünde (GER)	52,198	8,583	g, r
33	17	20:00	01:55	00:00	309 - 56	2,5	6 - 53	29,5	Köbelitz (GER)	52,180	11,782	g, r
34	17	20:30	23:00	20:15	296 - 21	338,5	0 - 33	16,5	Kalme, Wolfsbüttel (GER)	52,058	10,646	y, g, r, cr
35	17	21:00	21:30	20:15	301 - 33	347	9 - 41	25	Versmold (GER)	52,042	8,148	y, cr
36	17	19:00	01:30	23:45	310 - 37	353,5	5 - 43	24	Coesfeld (GER)	51,936	7,168	y, r
37	17	21:45	01:00	23:30	340 - 46	13	4 - 34	19	Merfeld (GER)	51,848	7,283	r, g
38	17	20:53	21:09	21:00	21 - 61	41	7 - 28	17,5	Dessau (GER)	51,831	12,242	r
39	17	20:00	01:30	-	342 - 62	22	4 - 40	22	Sanct Andreasberg (GER)	51,712	10,523	g, r, cr
40	17	19:40	-	23:15	329 - 34	1,5	3 - 37	20	Cottbus (GER)	51,757	14,333	g, r
41	17	-	-	21:30	337 - 42	9,5	7 - 27	17	Nordkirchen (GER)	51,738	7,522	g, r, pi
42	17	-	-	00:00	316 - 29	352,5	12 - 39	25,5	Gladbeck (GER)	51,571	6,985	r
43	17	21:00	-	22:00	344 - 16	0	11 - 24	17,5	Dortmund (GER)	51,514	7,465	cr
44	17	-	-	22:30	331 - 40	5,5	2 - 41	21,5	Riesa (GER)	51,317	13,268	g, w, r

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

45	17	19:40	00:12	23:30	325 - 39	2	5 - 39	22	Lampertswalde (GER)	51,310	13,676	g, r, cr
46	17	20:33	23:05	21:15	323 - 59	11	0 - 37	18,5	Collm (GER)	51,301	13,017	g, r, cr, pi
47	17	20:50	00:04	00:00	322 - 10	346	7 - 39	23	Bad Sooden Allendorf (GER)	51,269	9,980	g, r
48	17	21:00	-	21:30	326 - 16	351	0 - 30	15	Mönchengladbach (GER)	51,179	6,443	g, b
49	17	21:04	00:27	00:00	301 - 19	340	5 - 30	17,5	Reichenberg, Moritzburg (GER)	51,129	13,681	g, w, pi
50	17	21:10	-	22:10	25 - 49	37	9 - 24	16,5	Heinsberg (GER)	51,059	6,118	r
51	17	20:59	-	21:00	319 - 31	10	6 - 32	19	Kretzschau (GER)	51,054	12,077	g, r, cr
52	17	-	-	23:45	347 - 52	19,5	5 - 39	22	Dresden (GER)	51,051	13,737	y, g, r
53	17	23:55	00:20	00:15	331 - 19	355	5 - 29	17	Tautenhain (GER)	50,922	11,905	g, r
54	17	19:40	21:30	21:00	311 - 58	4,5	6 - 42	24	Jena (GER)	50,927	11,589	g, r, cr
55	17	21:15	-	20:45	315 - 21	348	4 - 26	15	Jena (GER)	50,927	11,589	g, r, cr
56	17	21:45	00:20	22:45	330 - 27	358,5	6 - 30	18	Brand-Erbisdorf (GER)	50,867	13,324	r, g
57	17	21:30	-	21:07	316 - 39	357,5	0 - 30	15	Neunkirchen-Seelscheid (GER)	50,855	7,332	g, cr
58	17	21:10	-	21:45	311 - 37	354	0 - 29	14,5	Hennef (GER)	50,760	7,283	g, cr
59	17	22:15	-	23:08	318 - 43	0,5	3 - 52	27,5	Hohensolms (GER)	50,652	8,516	g, r
60	17	20:38	21:28	21:00	302 - 20	341	6 - 47	26,5	Simmerath (GER)	50,607	6,299	b, cr
61	17	21:07	21:55	20:30	286 - 64	355	6 - 35	20,5	Schwarzenberg (GER)	50,543	12,779	g, cr, pi
62	17	19:50	-	-	271 - 340	305,5	- - 40	40	Hinternah (GER)	50,518	10,794	cr
63	17	23:58	00:14	23:30	317 - 45	1,5	4 - 38	21	Großer Feldberg (GER)	50,234	8,459	g, pi
64	17	-	-	21:00	320 - 26	353,5	5 - 31	18	Würzburg (GER)	49,791	9,954	r, cr
65	17	20:50	22:15	21:00	300 - 60	45	10 - 15	12,5	Niederstetten (GER)	49,399	9,919	g, r
66	17	23:50	-	23:50	321 - 29	355	9 - 46	27,5	Waghäusel (GER)	49,250	8,515	r
67	17	21:24	-	21:24	313 - 27	350	5 - 35	20	Hermersbergerhof-Pfälzerwald (GER)	49,247	7,836	cr, pi
68	17	-	-	23:50	339 - 53	16	0 - 28	14	Regensburg (GER)	49,015	12,101	g, w, r
69	17	-	-	00:00	343 - 17	0	10 - 24	17	Erdweg-Walkertshofen (GER)	48,324	11,293	r, cr
70	17	02:08	-	23:45	327 - 38	2,5	5 - 26	15,5	Hohenzell (GER)	48,350	11,186	g, r, pi
71	17	21:00	00:30	22:00	308 - 354	331	14 - 28	21	Bad Endorf (GER)	47,907	12,301	cr
72	17	22:30	-	22:30	295 - 116	25,5	0 - 81	40,5	Lindenberg, Allgäu (GER)	47,604	9,888	g, r
73	17	-	-	23:30	318 - 44	1	7 - 23	15	Schöckl, Graz (AUT)	47,183	15,482	y, r
74	17	20:59	21:14	-	5 - 22	13,5	14 - 40	27,5	Hohen Sonnblick (AUT)	47,054	12,957	r, cr
75	17	21:00	-	21:00	10 - 38	24	4 - 9	6,5	Mölltaler Gletscher (AUT)	46,980	13,006	r
76	17	00:59	-	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Espoo (FIN)	60,207	24,652	g, r
77	17	00:48	-	-	35 - 35	350	13 - 60	36,5	Tampere (FIN)	61,496	23,756	g, cr
78	17	06:30	-	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Donnelly Creek (AK, USA)	63,676	-145,883	g, r
79	17	22:56	-	-	0 - 0	0	7 - 15	11	Moskow (RUS)	55,750	37,599	g
80	17	20:50	-	-	0 - 0	0	5 - 34	19,5	Feldberg (GER)	47,875	8,006	g, r
81	17	23:1	-	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Northumberland (GBR)	55,229	-2,185	g, r, pi
82	17	21:28	-	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Isle of Mull (GBR)	56,436	-6,004	g, r
83	17	20:00	-	-	287 - 354	320,5	8 - 40	24	Northumberland (GBR)	55,229	-2,185	g, r, pi
84	17	04:00	-	-	355 - 39	17	0 - 22	11	Paradox Valley (CO, USA)	38,325	-108,865	g, r
85	17	00:26	-	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Kiruna (SWE)	67,856	20,226	g
86	17	22:36	-	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Sodankylä (FIN)	67,416	26,588	-
87	17	22:30	-	-	5 - 22	13,5	14 - 40	27	Sonnblick (AUT)	47,054	12,957	r, cr
88	17	03:00	-	-	338 - 23	0,5	11 - 23	17	Hokkaido (JPN)	43,33	142,58	r
89	17	00:15	-	-	272 - 54	343	5 - 36	20,5	Jena (GER)	50,927	11,589	g, r
90	17	23:30	-	-	323 - 31	357	20 - 66	43	Northumberland (GBR)	55,229	-2,185	g, r, pi
91	17	20:59	-	-	340 - 54	2	9 - 18	13,5	Jance (SVN)	46,064	14,696	or, r
92	17	21:00	-	-	287 - 48	347,5	10 - 24	17	Ritosa (GER)	51,317	13,268	y, r, pi
93	17	03:30	-	-	0 - 98	49	19 - 66	42,5	Barriere (CAN)	51,182	-120,123	g, bl, w, r
94	17	21:20	-	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Narsarsuaq (GRL)	61,157	-45,425	-

95	17	03:10	-	-	0	90 - 90	90	Athabasca (ON, CAN)	54,722	-113,286	-
96	17	03:20	-	-	0	90 - 90	90	Calgary (AB, CAN)	51,044	-114,073	-
97	17	05:30	-	-	0	90 - 90	90	Goose Bay (NL, CAN)	53,299	-60,335	-
98	17	03:45	-	-	0	90 - 90	90	Fort Simpson (NT, CAN)	61,863	-121,358	-
99	17	04:30	-	-	0	90 - 90	90	Fort Smith (NT, CAN)	60,005	-111,899	-
100	17	01:30	-	-	0	90 - 90	90	McGrath (AK, USA)	62,954	-155,593	-
101	17	05:00	-	-	0	90 - 90	90	Pinawa (MB, CAN)	50,151	-95,879	-
102	17	01:50	-	-	0	90 - 90	90	Rabbit Lake (SK, CAN)	53,142	-107,767	-
103	17	01:20	-	-	0	90 - 90	90	Kuujuuaq (QC, CAN)	58,104	-68,419	-
104	17	19:26	03:26	-	0	90 - 90	90	Oblast Nischni Nowgorod (RUS)	56,322	43,924	pi, g, r
105	17	19:44	20:14	-	0	90 - 90	7,5	Covasna (ROU)	45,846	26,177	r
106	17	-	02:14	-	0	5 - 10	45	Danzig (POL)	54,353	18,639	g, w
107	17	17:56	-	23:40	359 - 121	5 - 68	36,5	Salte (NOR)	58,708	5,592	g, w, r
108	17	19:59	01:59	-	330 - 30	0	45 - 45	Valga (EST)	57,781	26,053	g, w
109	17	20:03	01:03	-	0 - 360	0	5 - 90	Pieksämäki (FIN)	62,294	27,132	pi, g, r
110	17	20:42	21:12	-	0 - 360	0	5 - 90	Stockholm (SWE)	59,327	18,069	g
111	17	20:30	03:30	-	0 - 360	0	90 - 90	Saare maakond (EST)	58,265	22,478	pi, g, w, r
112	17	20:39	01:09	-	0 - 360	0	5 - 90	Helsinki (FIN)	60,167	24,963	g, r
113	17	21:08	-	-	0 - 360	0	90 - 90	Lahti (FIN)	60,979	25,657	-
114	17	20:32	-	-	0 - 360	0	5 - 90	Luosto (FIN)	67,133	26,899	-
115	17	22:44	22:59	-	0 - 360	0	5 - 90	Mala (SWE)	65,185	18,749	g, w
116	17	21:18	00:03	-	330 - 30	0	5 - 10	Alkmaar (NED)	52,632	4,755	w
117	17	20:01	-	20:15	289 - 17	5 - 53	29	Trefelwys (GBR)	52,502	-3,519	p, w, bl
118	17	21:20	21:05	-	0 - 360	0	90 - 90	Isle of Skye (GBR)	57,272	-6,235	p, pi
119	17	22:39	23:24	-	0 - 360	0	90 - 90	Karlstad (SWE)	59,401	13,510	w, r
120	17	23:00	02:30	-	0 - 360	0	5 - 90	Grieselehamm (SWE)	60,096	18,806	g, w
121	17	00:09	02:54	-	0 - 360	0	5 - 90	Tallinn (EST)	59,441	24,757	pi, g, w
122	17	23:04	00:19	-	0 - 360	0	5 - 90	Groa (NOR)	62,644	8,729	g
123	17	21:33	01:33	-	0 - 360	0	5 - 90	Lewis and Harris (GBR)	58,249	-6,666	g, w, r, p
124	17	20:17	20:32	-	0 - 360	0	90 - 90	Reykjavik (ISL)	64,146	-21,946	g
125	17	19:56	-	22:00	31 - 106	11 - 50	30,5	Kirkjufell (ISL)	64,942	-23,307	g
126	17	00:09	00:24	-	330 - 30	0	5 - 10	Göttingen (GER)	51,542	9,914	r
127	17	23:56	01:23	-	330 - 30	0	5 - 10	Fürstenwalde (GER)	52,369	14,067	pi, g, w, r
128	17	00:37	01:37	-	330 - 30	0	5 - 10	Posen (POL)	52,408	16,915	pi, g
129	17	22:48	23:18	-	330 - 30	0	5 - 10	Bairrigg (GBR)	54,011	-2,787	-
130	17	23:59	01:14	-	330 - 30	0	5 - 10	Puisieux-et-Clanlieu (FRA)	49,853	3,677	w
131	17	23:28	-	20:30	321 - 16	11 - 43	27	Cassel (FRA)	50,799	2,486	p
132	18	00:19	00:34	-	330 - 30	0	5 - 10	Cloughton (GBR)	54,093	-2,669	g
133	18	23:46	02:16	-	0 - 360	0	90 - 90	Dalvik (ISL)	65,971	-18,533	pi, g, w, p
134	18	20:04	20:19	-	330 - 30	0	5 - 10	New York (NY, USA)	40,715	-73,994	g
135	18	20:03	20:18	-	330 - 30	0	45 - 45	Paterson (NJ, USA)	40,917	-74,174	w
136	18	20:18	21:03	-	330 - 30	0	5 - 10	Hustontown (PA, USA)	40,049	-78,027	pi, g, r
137	18	20:04	23:49	-	330 - 30	0	45 - 45	Rochester (NY, USA)	43,157	-77,612	g, r, p
138	18	20:21	22:51	-	330 - 30	0	5 - 10	Newark (OH, USA)	40,065	-82,416	g
139	18	20:51	20:33	-	330 - 30	0	5 - 10	St. Johns (MI, USA)	43,000	-84,559	g
140	18	20:33	20:48	-	330 - 30	0	5 - 10	Rodney (MI, USA)	43,673	-85,329	g
141	18	22:29	23:44	-	330 - 30	0	5 - 10	Quebec (QC, CAN)	46,809	-71,204	g
142	18	21:49	21:49	-	330 - 30	0	45 - 45	Saratoga Springs (NY, USA)	43,086	-73,786	g
143	18	21:52	22:07	-	330 - 30	0	5 - 10	Cascade Falls (VA, USA)	37,354	-80,599	g, r
144	18	22:12	22:42	-	330 - 30	0	5 - 10	Newmarket (ON, CAN)	44,059	-79,459	g

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

145	18	21:34	01:04	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Southampton (ON, CAN)	44,495	-81,369	pi, g
146	18	21:35	21:50	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Grabill (IN, USA)	41,211	-84,967	g
147	18	21:17	21:32	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Traverse City (MI, USA)	44,763	-85,621	g, w, bl
148	18	20:33	20:48	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Beaver Island (MI, USA)	45,645	-85,555	g
149	18	21:09	02:39	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Marinette (WI, USA)	45,099	-87,632	g, r
150	18	20:45	21:30	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Zimmerman (MN, USA)	45,443	-93,591	g, or
151	18	21:15	21:15	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Milaca (MN, USA)	45,756	-93,655	pi, g
152	18	21:07	21:22	-	330 - 30	0	45 - 45	45	Ely (MN, USA)	47,903	-91,848	g
153	18	20:34	21:49	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Zhoda (MB, CAN)	49,284	-96,510	pi, g, p
154	18	19:58	19:58	-	0 - 360	0	5 - 90	90	Elke island national park (AB, CAN)	53,608	-112,862	pi, g, w, p, bl
155	18	19:34	20:49	-	0 - 360	0	5 - 90	90	Fort McMurray (AB, CAN)	56,724	-111,381	pi, g, r
156	18	21:29	23:14	-	330 - 30	0	45 - 45	45	Drumheller (AB, CAN)	51,459	-112,718	g
157	18	20:23	20:38	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Olds (AB, CAN)	51,795	-114,120	g, r
158	18	21:16	23:46	-	0 - 360	0	5 - 90	90	Hay River (NT, CAN)	60,816	-115,788	pi, g, w
159	18	00:47	01:02	-	0 - 360	0	5 - 90	90	Orange (VA, USA)	38,245	-78,112	pi, g, r, or
160	18	00:01	00:46	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Winnipeg (MB, CAN)	49,895	-97,139	g, w
161	18	20:28	20:43	-	0 - 360	0	90 - 90	90	McCarthy (AK, USA)	61,433	-142,938	g
162	18	21:12	22:27	-	330 - 30	0	45 - 45	45	Dawson (YK, CAN)	64,044	-139,429	pi, w
163	18	21:30	21:45	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Anchorage (AK, USA)	61,221	-149,919	w
164	18	20:54	23:09	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Fairbanks (AK, USA)	64,839	-147,723	pi, g, w, r, bl
165	18	00:47	01:47	-	330 - 30	0	5 - 10	7,5	Vancouver (BC, CAN)	49,282	-123,123	g
166	18	01:15	02:00	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Lake Louise (AB, CAN)	51,425	-116,178	w
167	18	01:57	02:57	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Alix (AB, CAN)	52,399	-113,194	pi, g, w, r
168	18	22:00	-	20:00	4 - 81	42,5	5 - 45	25	Rjasan (RUS)	54,610	39,706	g, r, p, y
169	18	22:45	23:00	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Mala (SWE)	65,185	18,749	g
170	18	00:06	-	00:06	342 - 66	24	5 - 52	28,5	Kiel Bülk (GER)	54,456	10,127	r, w, pi
171	18	00:15	01:30	-	342 - 33	7,5	10 - 31	20,5	Büdseldorf (GER)	54,319	9,680	-
172	18	00:13	-	20:45	312 - 35	353,5	4 - 45	24,5	Stavenhagen (GER)	53,699	12,909	g, r, cr
173	18	00:10	-	-	345 - 19	25,5	7 - 21	14	Bremerhaven (GER)	53,539	8,583	g, r
174	18	00:18	00:30	-	305 - 56	0,5	19 - 58	38,5	Sandplacken (GER)	50,245	8,430	r
175	18	00:58	-	-	360 - 51	25,5	7 - 43	25	Sittensen (GER)	53,281	9,512	g, pi
176	18	00:30	-	00:30	330 - 49	9,5	8 - 45	26,5	Gudensberg (GER)	51,177	9,369	g, r
177	18	00:22	00:25	-	306 - 45	355,5	2 - 47	24,5	Nassau (GER)	50,766	13,544	g, pi
178	18	00:21	-	00:21	357 - 71	34	7 - 48	27,5	Mömbis (GER)	50,169	9,157	y, r
179	18	00:14	-	00:14	309 - 70	9,5	6 - 34	20	Fornach (AUT)	48,023	13,428	r
180	18	00:58	01:07	-	353 - 51	22	9 - 34	21,5	Schörfling (AUT)	47,936	13,605	r
181	18	01:14	-	01:14	288 - 21	334,5	0 - 30	15	Gahberg (AUT)	47,914	13,606	r
182	18	00:10	-	00:10	18 - 30	24	8 - 11	9,5	Achensee (AUT)	47,462	11,709	cr
183	18	00:25	-	00:25	308 - 358	333	6 - 15	10,5	Gais (CHE)	47,362	9,453	g, pi
184	18	00:10	00:20	-	321 - 41	1	6 - 25	15,5	Wiltberg (CHE)	47,269	8,022	cr, pi
185	18	22:00	-	-	353 - 14	3,5	3 - 15	9	New York (NY, USA)	40,715	-73,994	y, b
186	18	00:30	-	-	0 - 360	0	5 - 90	90	Hankasalm (FIN)	62,389	26,436	r, g

TABELLE D.4: Quellen der 168 genutzten Beobachtungen des St. Patrick’s Day-Sturms 2015. “Polarlicht-Archiv” bezeichnet das Archiv von Andreas Möller, welches unter <http://www.polarlicht-archiv.de/> abrufbar ist. Aurorasaurus ist ein Bürgerwissenschaftsprojekt mit Polarlichtsichtungen *MacDonald et al.* [2015].

Nr.	Beobachter	Quelle
1	Philip Schulze	Polarlicht-Archiv
2	Leibniz-Institut/ Atmosphärenphysik	Polarlicht-Archiv
3	Laura Kranich	Polarlicht-Archiv
4	Carsten Jonas	Polarlicht-Archiv
5	Tim Peukert	Polarlicht-Archiv
6	Thorsten Witt	Polarlicht-Archiv
7	Sören Petersen	Polarlicht-Archiv
8	Bernd Pfeifer	Polarlicht-Archiv
9	Nadja Giesau	Polarlicht-Archiv
10	Brigitte Rauch	Polarlicht-Archiv
11	Stefan Heitmann	Polarlicht-Archiv
12	Michael Heiß	Polarlicht-Archiv
13	Andreas Kluck	Polarlicht-Archiv
14	Denis Hessberger	Polarlicht-Archiv
15	Uwe Freitag	Polarlicht-Archiv
16	Hartwig Luethen	Polarlicht-Archiv
17	Thomas Rickert	Polarlicht-Archiv
18	Torsten M.	Polarlicht-Archiv
19	Joachim Ostendorf	Polarlicht-Archiv
20	Uwe Müller	Polarlicht-Archiv
21	Joh	Polarlicht-Archiv
22	Ulrich Rieth	Polarlicht-Archiv
23	Andreas Abeln	Polarlicht-Archiv
24	Sven Beermann	Polarlicht-Archiv
25	Gaby Klüber	Polarlicht-Archiv
26	Andreas Möller	Polarlicht-Archiv
27	Daniel Ricke	Polarlicht-Archiv
28	Anke Klemcke	Polarlicht-Archiv
29	Jörg Ö.	Polarlicht-Archiv
30	Sven Lüke	Polarlicht-Archiv
31	Stefan Fockenber	Polarlicht-Archiv
32	Ole Wortmann	Polarlicht-Archiv
33	Astrid Beyer	Polarlicht-Archiv
34	Michael Müller	Polarlicht-Archiv
35	Mathias H.	Polarlicht-Archiv
36	Andre P.	Polarlicht-Archiv
37	Sven Wienstein	Polarlicht-Archiv
38	Thomas Nemet	Polarlicht-Archiv
39	Sibylle Lage	Polarlicht-Archiv
40	Chris Sommer	Polarlicht-Archiv
41	Ben Mestermann	Polarlicht-Archiv
42	Anke Mo.	Polarlicht-Archiv
43	Jonas Bartscher	Polarlicht-Archiv
44	Sabrina Hofmann	Polarlicht-Archiv
45	Uwe Thieme	Polarlicht-Archiv
46	Tilo Schroth	Polarlicht-Archiv
47	Timo Lohrberg	Polarlicht-Archiv
48	Sebastian Alberts	Polarlicht-Archiv
49	Maik Simon	Polarlicht-Archiv
50	Bernd Tillmanns	Polarlicht-Archiv
51	Karsten Hansky	Polarlicht-Archiv
52	Norbert Bläsner	Polarlicht-Archiv
53	Michael Pflüger	Polarlicht-Archiv
54	Mandy Skibba	Polarlicht-Archiv
55	Jan Schulhauser	Polarlicht-Archiv
56	Heiko Ulbricht	Polarlicht-Archiv
57	Anja Hoff	Polarlicht-Archiv
58	Markus Retzlaff	Polarlicht-Archiv
59	HR Maurer	Polarlicht-Archiv
60	René Pelzer	Polarlicht-Archiv
61	Claudia Hinz	Polarlicht-Archiv
62	Fabian Wimmer	Polarlicht-Archiv
63	Michael Theusner	Polarlicht-Archiv
64	Georg Keller	Polarlicht-Archiv
65	Andy Neumaier	Polarlicht-Archiv
66	Oswald Dörwang	Polarlicht-Archiv

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

67	Raik Krotofil	Polarlicht-Archiv
68	Wolf-Peter Hartmann	Polarlicht-Archiv
69	Roman Breisch	Polarlicht-Archiv
70	Alois Doblinger	Polarlicht-Archiv
71	Thomas Klein	Polarlicht-Archiv
72	Michael Jöhler	Polarlicht-Archiv
73	Roswitha Karpf	Polarlicht-Archiv
74	Hermann Scheer	Polarlicht-Archiv
75	foto-webcam.eu	Polarlicht-Archiv
76	-	http://www.metsahovi.fi/allsky-gallery
77	Patrick Ford	https://www.flickr.com/photos/djseventen/16847227882/in/photostream/
78	Sebastian Saarloos	https://www.huffingtonpost.com/2015/03/18/st-patricks-day-aurora-northern-lights_n_6896118.html?guccounter=1
79	Dimitry Matsnev	http://www.skyandtelescope.com/online-gallery/aurora-over-moscow-on-march-17-2015-2256-ut/
80	Michael Theusner	Polarlicht-Archiv
81	Steve Clasper	https://www.flickr.com/photos/sclasper
82	John	https://twitter.com/GM7PBB/status/577967626871291905/photo/1?ref_src=twsrc%5Etfw&ref_url=http%3A%2F%2Fmetro.co.uk%2F2015%2F03%2F18%2Fnorthern-lights-did-you-see-aurora-borealis-last-night-5108614%2F
83	Steve Clasper	https://www.flickr.com/photos/sclasper
84	Derick Wilson	https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85556
85	-	http://www2.irf.se/allsky/
86	-	http://sgo.fi/Data/AllSky/allskyData.php
87	Hermann Scheer	Polarlicht-Archiv
88	-	https://www.japantimes.co.jp/news/2015/03/19/national/science-health/hokkaido-sighting-first-aurora-observation/-in-japan-since-2004/
89	AIU	http://www.astro.uni-jena.de/index.php/gsh-home.html
90	Steve Clasper	https://www.flickr.com/photos/sclasper
91	Javor Kac	http://www.orion-drustvo.si/MBKTeam/sunrora/20150317.htm
92	-	http://www.sternfreunde-riesa.de/bildergalerie/atmosphaerische-phaenomene/aurora-borealis-nordlichter/polarlichter-maerz-2015/
93	Lisa-Marie Morgan	https://twitter.com/tenacrewood/status/577798412323663872/photo/1
94	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
95	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
96	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
97	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
98	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
99	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
100	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
101	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
102	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
103	AGO Keograms	https://data-portal.phys.ucalgary.ca/ago/keograms/
104	-	Aurorasaurus
105	-	Aurorasaurus
106	-	Aurorasaurus
107	-	Aurorasaurus
108	-	Aurorasaurus
109	-	Aurorasaurus
110	-	Aurorasaurus
111	-	Aurorasaurus
112	-	Aurorasaurus
113	-	Aurorasaurus
114	-	Aurorasaurus
115	-	Aurorasaurus
116	-	Aurorasaurus
117	-	Aurorasaurus
118	-	Aurorasaurus
119	-	Aurorasaurus
120	-	Aurorasaurus
121	-	Aurorasaurus
122	-	Aurorasaurus
123	-	Aurorasaurus
124	-	Aurorasaurus
125	-	Aurorasaurus
126	-	Aurorasaurus
127	-	Aurorasaurus
128	-	Aurorasaurus
129	-	Aurorasaurus
130	-	Aurorasaurus
131	-	Aurorasaurus
132	-	Aurorasaurus
133	-	Aurorasaurus
134	-	Aurorasaurus
135	-	Aurorasaurus
136	-	Aurorasaurus

137	-	Aurorasaurus
138	-	Aurorasaurus
139	-	Aurorasaurus
140	-	Aurorasaurus
141	-	Aurorasaurus
142	-	Aurorasaurus
143	-	Aurorasaurus
144	-	Aurorasaurus
145	-	Aurorasaurus
146	-	Aurorasaurus
147	-	Aurorasaurus
148	-	Aurorasaurus
149	-	Aurorasaurus
150	-	Aurorasaurus
151	-	Aurorasaurus
152	-	Aurorasaurus
153	-	Aurorasaurus
154	-	Aurorasaurus
155	-	Aurorasaurus
156	-	Aurorasaurus
157	-	Aurorasaurus
158	-	Aurorasaurus
159	-	Aurorasaurus
160	-	Aurorasaurus
161	-	Aurorasaurus
162	-	Aurorasaurus
163	-	Aurorasaurus
164	-	Aurorasaurus
165	-	Aurorasaurus
166	-	Aurorasaurus
167	-	Aurorasaurus
168	-	Aurorasaurus
169	-	Aurorasaurus
170	Achim Hellmann	Polarlicht-Archiv
171	Michael Green	Polarlicht-Archiv
172	Wolfgang Hamburg	Polarlicht-Archiv
173	Georg van Druenen	Polarlicht-Archiv
174	Hennig Wrage	Polarlicht-Archiv
175	Nils N.	Polarlicht-Archiv
176	Lutz Schenk	Polarlicht-Archiv
177	Mathias Fleischer	Polarlicht-Archiv
178	Markus Pfarr	Polarlicht-Archiv
179	Hermann Koberger	Polarlicht-Archiv
180	Wolfgang Gebetsroither	Polarlicht-Archiv
181	Erwin Filimon	Polarlicht-Archiv
182	addicted-sports.com	Polarlicht-Archiv
183	Mark Vornhusen	Polarlicht-Archiv
184	Heiko Rodde	Polarlicht-Archiv
185	Melanie Kern-Favilla	https://twitter.com/mkfphotos/status/578024691471773696
186	-	https://www.youtube.com/watch?v=cTzAL1f_kyE

TABELLE D.5: Auflistung der 49 ungenutzten Sichtungen des St. Patrick's Day-Sturms am 17. und 18.03.2015. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, ST: Zeit nach Stellarium, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, b: blau

Nr.	Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	ST [LT]	az [°]	\bar{az} [°]	h [°]	\bar{h} [°]	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Farbe
1	17	-	-	-	-	-	-	-	Anrum (GER)	54,663	8,339	-
2	17	-	-	-	-	-	-	-	Bredstedt (GER)	54,619	8,966	-
3	17	-	-	-	-	-	-	-	Bülker Leuchtturm (GER)	54,455	10,197	-
4	17	22:00	00:45	-	-	-	-	-	Hessenstein (GER)	54,329	10,547	-
5	17	19:40	-	-	300 - 330	315,5	-	-	Klausdorf, Kiel (GER)	54,306	10,212	-
6	17	20:30	-	-	-	-	-	-	Wankendorf (GER)	54,112	10,204	-
7	17	-	-	-	-	-	-	-	Pariner Berg (GER)	53,947	10,679	-
8	17	-	-	-	-	-	-	-	Pariner Berg (GER)	53,947	10,679	g, w, r
9	17	21:00	00:30	-	-	-	-	-	Funtensee (GER)	47,493	12,939	-
10	17	00:36	-	-	-	-	-	-	Dunedin (NZL)	-45,880	170,501	g, r
11	17	19:17	-	-	-	-	-	-	Kouvola (FIN)	60,865	26,683	-
12	17	19:13	-	-	-	-	-	-	Miluranta (FIN)	63,962	26,015	g
13	17	18:38	-	-	-	-	-	-	Harstad (NOR)	68,798	16,54	g
14	17	19:30	-	-	-	-	-	-	Skjernice (POL)	51,955	20,157	-
15	17	20:20	-	-	-	-	-	-	Rondane (NOR)	61,932	9,789	g, r
16	17	22:30	22:30	-	-	-	-	-	Lossiemouth (GBR)	57,722	-3,28	-
17	17	22:36	-	-	-	-	-	-	Medvednica (CRO)	45,918	15,966	-
18	17	23:24	-	-	-	-	-	-	Kocser (HUN)	47,001	19,917	-
19	17	-	-	-	-	-	-	-	Oldenburg (GER)	53,144	8,214	-
20	17	23:00	23:30	-	-	-	-	-	Oldenburg (GER)	53,144	8,214	-
21	17	23:45	-	-	-	-	-	-	Brenen Blockland (GER)	53,142	8,845	r, g
22	17	21:25	21:45	-	-	-	-	-	Biesenthal (GER)	52,765	13,644	-
23	17	-	-	-	-	-	-	-	Linum (GER)	52,759	12,876	-
24	17	22:00	22:00	-	270 - 90	0	-	-	Liepnitzsee (GER)	52,748	13,507	r, cr, g
25	17	21:14	-	-	-	-	-	-	Gifhorn (GER)	52,482	10,551	-
26	17	20:00	22:00	-	-	-	-	-	Martensmünster (GER)	51,819	9,231	-
27	17	-	-	-	-	-	-	-	Bad Lippspring (GER)	51,784	8,816	-
28	17	20:50	21:20	-	270 - 10	320	-	-	Riesa (GER)	51,317	13,268	w
29	17	21:03	-	-	330 - 30	0	-	-	Niederkrüchten (GER)	51,199	6,219	cr
30	17	-	-	-	-	-	-	-	Dresden (GER)	51,051	13,737	g, cr
31	17	-	-	-	-	-	-	-	Bonn (GER)	50,739	7,098	g, cr
32	17	-	-	-	-	-	-	-	Bad Lobenstein (GER)	50,453	11,639	r, cr
33	17	21:00	-	-	-	-	-	-	Großer Feldberg (GER)	50,234	8,459	cr
34	17	23:55	00:35	-	330 - 30	0	-	-	Wackernheim (GER)	49,978	8,118	-
35	17	-	-	-	-	-	-	-	Trier (GER)	49,749	6,637	-
36	17	21:02	-	-	-	-	5	5	Kämpfelbach (GER)	48,949	8,624	-
37	17	21:00	00:30	-	-	-	-	-	Funtensee (GER)	47,493	12,939	-
38	17	22:01	-	-	-	-	-	-	Turku (FIN)	60,451	22,268	g, y
39	17	19:30	19:45	-	300 - 330	315	-	-	Berlin (GER)	52,519	13,405	w, pi
40	18	00:00	00:15	-	-	-	-	-	Isle of Man (GBR)	54,321	-4,531	-
41	18	01:45	02:00	-	-	-	-	-	Ballyshannon (IRL)	54,503	-8,192	-
42	18	01:45	-	-	-	-	-	-	Bulyea (SK, CAN)	50,985	-104,865	g, r
43	18	00:00	00:15	-	-	-	-	-	Isle of Man (GBR)	54,321	-4,531	-
44	18	01:45	02:00	-	-	-	-	-	Ballyshannon (IRL)	54,503	-8,192	-

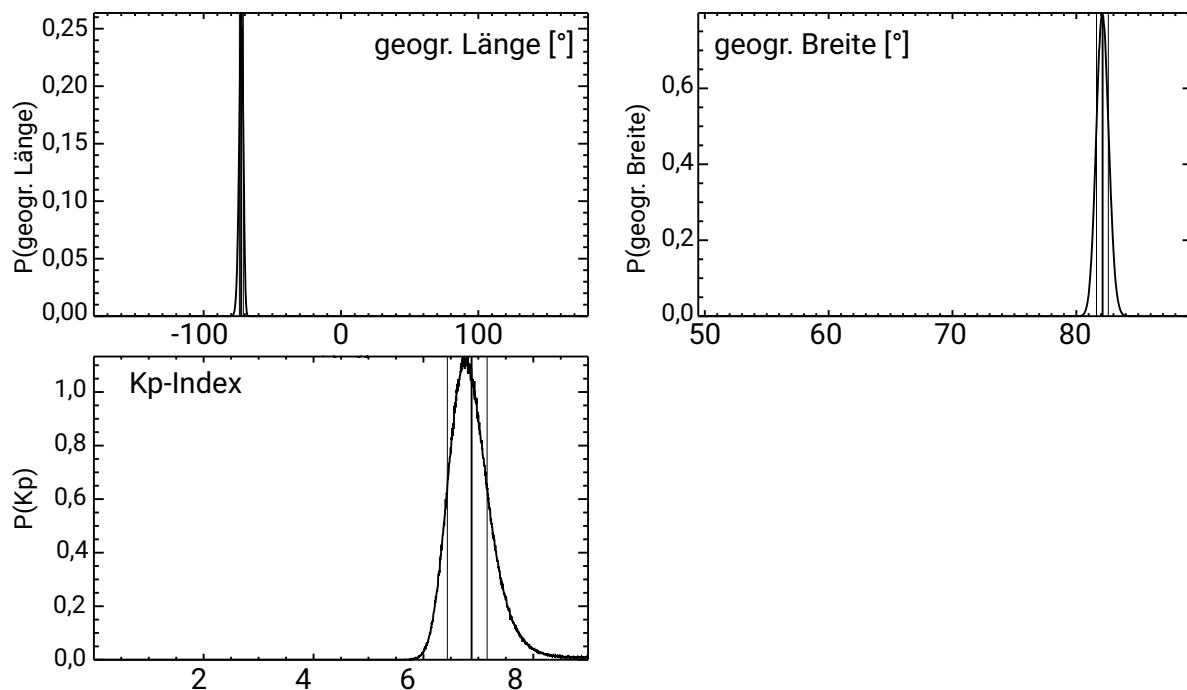


ABBILDUNG D.1: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter nach Methode 1 für den St. Patrick's Day-Sturm 2015.

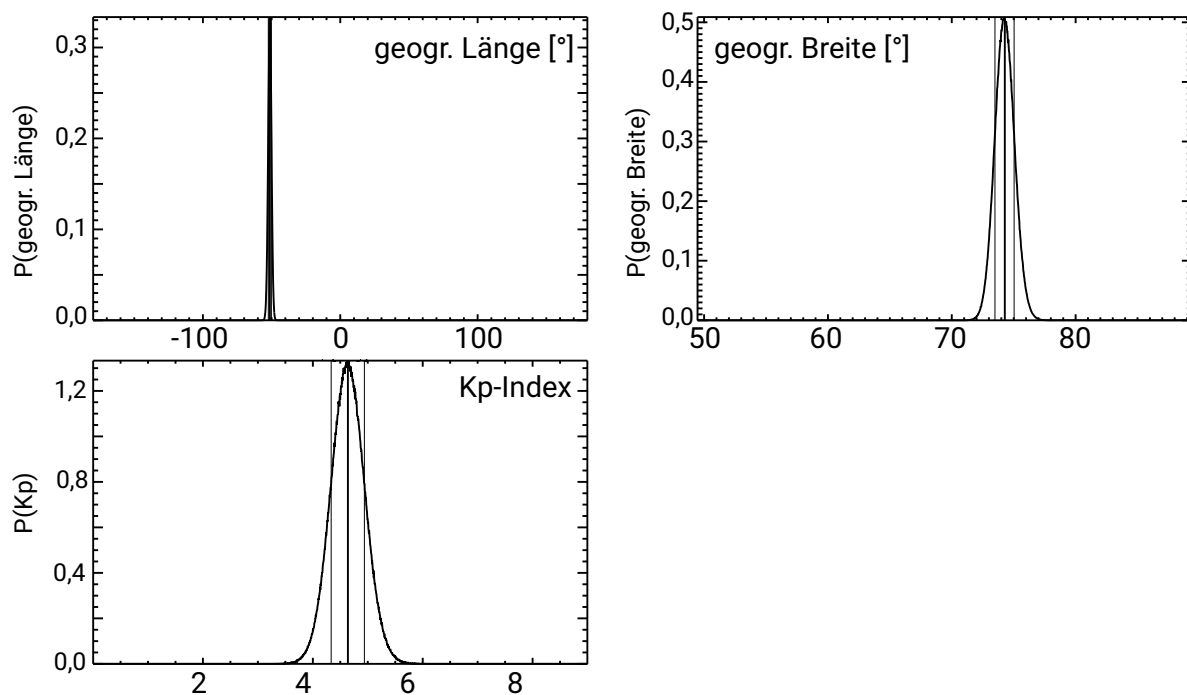


ABBILDUNG D.2: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter nach Methode 1 für den Halloween-Sturm 2003.

TABELLE D.7: Auflistung der 128 verwendeten Sichtungen des Halloween-Sturms am 29., 30. und 31.10.2003. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, ST: Zeit nach Stellarium, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, b: blau

Nr.	Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	ST [LT]	az [°]	\bar{az} [°]	h [°]	\bar{h} [°]	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Farbe
1	29	01:00	02:30	-	330 - 30	0	90	90	Heide (GER)	54,194	9,102	g
2	29	-	-	21:15	345 - 35	10	11 - 26	18,5	Greifswald (GER)	54,087	13,389	g
3	29	20:00	02:00	23:00	300 - 78	9	0 - 85	42,5	Bendorf (GER)	54,087	9,382	g, w, r
4	29	18:40	21:30	21:05	312 - 8	340	11 - 38	19,5	Diedrichshagen (GER)	54,169	12,029	g, w
5	29	21:30	23:00	21:45	334 - 29	1	9 - 33	21	Usedom (GER)	53,934	14,098	g, r
6	29	22:11	01:32	22:11	318 - 69	13,5	6 - 45	25,5	Bensersiel (GER)	53,676	7,577	g, r, cr
7	29	18:56	01:01	20:15	284 - 73	358,5	8 - 73	41	Westerstede (GER)	53,256	7,926	g, r, cr
8	29	-	-	20:00	291 - 345	318	9 - 31	20	Leer (GER)	53,235	7,466	g, r, cr
9	29	18:15	00:00	22:15	345 - 42	13,5	5 - 41	23	Wüste Kunersdorf (GER)	52,405	14,513	g, w, r, cr
10	29	-	-	19:45	332 - 26	359	5 - 36	20,5	Horstmar (GER)	52,081	7,306	g, r, cr
11	29	23:30	23:40	-	330 - 30	0	90	90	Ubbedissen (GER)	51,988	8,635	g, w
12	29	23:30	00:00	23:45	33 - 108	70,5	24 - 70	47	Münster (GER)	51,959	7,623	g, w, r
13	29	22:16	23:08	22:15	330 - 15	352,5	13 - 43	28	Bergkamen (GER)	51,616	7,624	g, cr
14	29	18:20	23:30	19:30	296 - 48	352	0 - 38	19	Görlitz (GER)	51,149	14,968	g, r, cr
15	29	18:26	21:05	19:00	330 - 2	346	8 - 41	24,5	Radebaul (GER)	51,111	13,650	g, r, cr
16	29	-	-	19:45	303 - 56	359,5	15 - 52	33,5	Radebaul (GER)	51,111	13,650	g, r
17	29	19:30	23:00	20:00	321 - 60	10,5	5 - 64	34,5	Kleefeld (GER)	52,369	9,796	g, r
18	29	23:45	00:15	00:00	331 - 40	34,5	13 - 42	32,5	Wittboh (GER)	47,936	8,827	g, r
19	29	00:47	01:10	01:10	6 - 42	24	6 - 24	15	Gais AR (CHE)	47,362	9,453	r
20	29	22:00	-	22:00	269 - 66	1	8 - 79	43,5	Vorarlberg (AUT)	47,226	9,873	g, r
21	29	19:07	23:55	01:00	306 - 8	337	0 - 42	21	Dissen (GER)	52,112	8,198	g, r
22	29	02:30	-	-	0 - 0	0	90 - 90	90	Orlando (FL, USA)	28,532	-81,381	r, y
23	29	18:45	-	-	29 - 86	57,5	5 - 44	24,5	Albany (MO, USA)	40,249	-94,331	r, y
24	29	-	-	20:45	23 - 95	59	5 - 42	23,5	Big Bay (ON, CAN)	44,791	-80,948	g, w, r
25	30	-	-	19:45	26 - 84	55	10 - 48	29	Elphin (ON, CAN)	44,923	-76,617	g, r
26	29	01:00	-	-	333 - 15	354	5 - 25	15	Salt Lake City (UT, USA)	40,759	-111,903	g, r
27	29	-	-	02:15	358 - 32	15	5 - 19	12	Houston (TX, USA)	29,756	-95,377	r
28	29	-	-	02:20	39 - 95	67	5 - 38	21,5	Iowa (IA, USA)	41,6	-93,7	r, w
29	29	03:15	-	-	330 - 34	2	9 - 25	17,5	Dahlonega (GA, USA)	34,526	-83,985	r
30	29	-	-	02:45	26 - 46	36	5 - 34	19,5	St. Jacob (IL, USA)	38,720	-89,769	g, r
31	29	-	-	05:00	338 - 25	1,5	5 - 26	15,5	Wichita (KS, USA)	37,687	-97,320	g, r
32	29	-	-	02:30	29 - 88	58,8	8 - 46	27	Divide (CO, USA)	38,942	-105,158	g, r
33	29	03:10	-	-	29 - 52	40,5	10 - 27	18,5	southeast Missouri (MO, USA)	37,1	-90,2	r
34	29	00:00	-	-	292 - 347	319,5	5 - 36	20,5	Spokane Valley (WA, USA)	47,673	-117,129	g, r
35	29	-	-	02:00	332 - 11	351,5	5 - 22	13,5	Yampa (CO, USA)	40,152	-106,909	g, r
36	29	04:00	-	02:45	358 - 62	30	5 - 38	21,5	Midland (TX, USA)	31,997	-102,078	r
37	29	-	-	20:30	72 - 109	90,5	6 - 42	24	Lake Wateree (SC, USA)	34,414	-80,828	r
38	29	-	-	18:00	187 - 276	231,5	24 - 57	40,5	Tromsø (NOR)	69,648	18,956	cr
39	29	-	-	23:00	285 - 335	310	10 - 28	19	Caledon (ON, CAN)	43,835	-79,879	g
40	29	-	-	02:00	327 - 42	4,5	5 - 44	24,5	LaOtto (IN, USA)	41,300	-85,801	g, w, r
41	30	00:00	01:11	-	0 - 360	0	0 - 90	90	Hamerstorf (GER)	52,917	10,459	g, r
42	30	-	-	00:57	289 - 103	16	14 - 68	41	Soltau (GER)	52,984	9,841	w, r
43	30	-	-	00:30	289 - 25	337	13 - 54	33,5	Bassum (GER)	52,850	8,726	g, r
44	30	21:30	03:00	-	0 - 360	0	0 - 90	90	Wedemark (GER)	52,546	9,731	-

45	30	01:11	02:30	02:14	337 - 48	35,5	6 - 32	19	Potsdam (GER)	52,389	13,060	g, w, y, r
46	30	21:00	01:30	20:30	313 - 17	345	0 - 43	21,5	Lehrte (GER)	52,376	9,975	g, r
47	30	21:50	02:45	23:30	290 - 7	328,5	11 - 41	26	Münster (GER)	51,959	7,623	w, r, cr
48	30	23:35	02:13	01:00	110 - 212	161	23 - 67	45	Oerlinghausen (GER)	51,951	8,661	g, r
49	30	23:30	01:45	23:45	338 - 24	1	12 - 39	25,5	Gütersloh (GER)	51,902	8,383	g, r
50	30	-	-	22:00	309 - 27	348	10 - 39	24,5	Merfeld (GER)	51,848	7,200	g, r, cr
51	30	-	-	23:00	315 - 7	341	7 - 36	21,5	Merfeld (GER)	51,848	7,200	g, w, r, cr, pi
52	30	-	-	23:00	315 - 7	341	7 - 36	21,5	Merfeld (GER)	51,848	7,200	g, w, r, cr, pi
53	30	21:30	22:00	22:09	12 - 68	40	9 - 51	30	Lippetal (GER)	51,662	8,142	g, r
54	30	22:00	01:30	22:00	271 - 321	296	0 - 30	15	Dortmund (GER)	51,514	7,465	g, r
55	30	-	-	23:30	2 - 79	40,5	5 - 54	29,5	Hagen (GER)	51,365	7,462	g, r, y
56	30	-	-	00:30	25 - 66	45,5	5 - 26	15,5	Burghasungen (GER)	51,323	9,277	g, r
57	30	00:15	01:20	23:30	254 - 313	283,5	23 - 43	33	Riesa (GER)	51,317	13,268	g, r
58	30	-	-	22:00	2 - 78	42,5	5 - 47	26	Kürten (GER)	51,051	7,263	g, r, w
59	30	01:00	02:00	23:00	352 - 50	20	0 - 39	19,5	Erfurt (GER)	50,986	11,029	g, r, cr
60	30	01:00	02:00	23:30	352 - 50	20	0 - 39	19,5	Erfurt (GER)	50,986	11,029	g, r, cr
61	30	-	-	21:15	291 - 346	318,5	3 - 28	15,5	Rodenkirchen (GER)	50,893	6,963	g, y, r
62	30	00:25	01:10	-	0 - 360	0	0 - 90	90	Chemnitz (GER)	50,827	12,919	g, r
63	30	-	-	20:45	337 - 11	354	13 - 30	21,5	Aachen (GER)	50,8774	6,083	g, r
64	30	18:00	01:00	20:45	325 - 9	347	9 - 27	18	Aachen (GER)	50,8774	6,083	g, r
65	30	-	-	22:00	18 - 66	42	7 - 30	18,5	St. Augustin-Niederpleis (GER)	50,771	7,211	g, r
66	30	-	-	00:30	40 - 84	62	0 - 38	19	Gebardshain (GER)	50,746	7,820	g, r
67	30	-	-	00:45	265 - 322	293,5	0 - 39	19,5	Stollberg (GER)	50,709	12,774	g, r, y
68	30	21:57	01:46	22:11	342 - 46	14	14 - 41	27,5	Schwalbach (GER)	50,148	8,536	g, r
69	30	22:30	00:15	-	330 - 30	0	70	70	Eschborn (GER)	50,147	8,561	g, r
70	30	-	-	22:30	273 - 352	312,5	5 - 45	25	Aschaffenburg (GER)	49,981	9,135	g, r, cr
71	30	23:30	-	23:30	16 - 70	43	5 - 37	21	Aschaffenburg (GER)	49,981	9,135	g, r, cr
72	30	21:00	01:00	00:00	14 - 79	46,5	4 - 43	23,5	Wertheim Main (GER)	49,757	9,513	g, y, r
73	30	-	-	22:30	13 - 71	42	9 - 40	24,5	Mainz-Ebersheim (GER)	49,959	8,266	g, b, r, cr
74	30	20:30	23:45	-	270 - 45	337,5	15 - 22	18,5	Darmstadt (GER)	49,872	8,648	g, w, r
75	30	20:51	01:39	22:30	298 - 83	10,5	10 - 62	36	Wolfsheim (GER)	49,874	8,039	g, r
76	30	-	-	21:00	327 - 23	355	0 - 31	15,5	Wolfsheim (GER)	49,874	8,039	g, r
77	30	20:54	00:20	-	0 - 360	0	90 - 90	90	Ober-Ramstadt (GER)	49,8331	8,743	g, r
78	30	21:00	23:30	22:00	66 - 238	152	52 - 70	61	Kleefeld (CAN)	49,502	-96,873	r
79	30	-	-	21:15	323 - 14	348,5	4 - 32	18	Wendelstein (GER)	49,351	11,155	g, r
80	30	22:00	22:30	22:30	349 - 36	12,5	0 - 30	15	Möckmühl-Züttlingen (GER)	49,296	9,331	g, r
81	30	-	-	20:45	332 - 19	355,5	0 - 21	10,5	Waghäusel (GER)	49,249	8,515	g, r
82	30	22:00	23:15	-	270 - 90	0	0 - 90	90	Sinsheim (GER)	49,249	8,888	g, r
83	30	22:00	22:15	20:45	328 - 22	355	7 - 30	18,5	Hohenfels (GER)	49,203	11,849	g, r
84	30	-	-	22:45	317 - 15	346	5 - 39	22	Rottal (GER)	49,002	15,023	g, b, r
85	30	-	-	23:15	277 - 23	330	8 - 37	22,5	Schlierbach (GER)	48,674	9,518	g, r
86	30	20:00	20:20	22:00	286 - 58	352	6 - 41	23,5	Gerstetten (GER)	48,623	10,019	g, r
87	30	21:13	22:30	22:00	311 - 10	340,5	0 - 40	20	Tübingen(GER)	48,522	9,056	g, r
88	30	21:37	01:38	22:18	333 - 22	8,5	0 - 29	14,5	Haimhausen (GER)	48,315	11,554	g, r
89	30	-	-	23:00	350 - 78	34	5 - 49	27	Meggenhofen (GER)	48,180	13,796	g, r
90	30	00:10	22:35	00:12	10 - 68	39	0 - 54	27	Fürstentfeldbruck (GER)	48,174	11,243	g, r
91	30	20:20	00:30	-	315 - 45	0	0 - 80	40	Puchheim (GER)	48,150	11,350	g, r, w
92	30	01:00	02:00	01:00	280 - 341	310,5	6 - 44	25	Steyr (AUT)	48,050	14,418	g, r
93	30	01:27	02:42	01:27	353 - 56	24,5	7 - 45	26	Seewalchen am Attersee (AUT)	47,952	13,584	g, r
94	30	23:00	23:30	22:00	10 - 66	38	5 - 42	23,5	Fellach (GER)	47,903	11,733	g, r, cr

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

95	30	21:15	22:30	-	315 - 45	0	60 - 60	60	Sonnenreuth (GER)	47,775	11,915	g, w, cr, r
96	30	-	-	23:00	354 - 48	21	12 - 35	23,5	Gais AR (CHE)	47,362	9,453	r
97	30	-	-	22:00	319 - 21	350	7 - 34	20,5	Mäder, Vorarlberg (AUT)	47,349	9,619	r
98	30	-	-	22:00	269 - 109	9	0 - 48	24	Vorarlberg (AUT)	47,249	9,979	r
99	30	-	-	19:30	326 - 1	343,5	3 - 25	14	Zermatt (CHE)	46,021	7,748	g, w, r
100	30	-	-	20:00	331 - 23	357	5 - 51	28	Maine (NY, USA)	42,193	-76,061	g, y, r
101	30	-	-	19:15	325 - 346	335,5	5 - 35	20	Franklin (TN, USA)	35,924	-86,869	r
102	30	-	-	03:00	346 - 64	25	5 - 43	24	Dover (OK, USA)	35,981	-97,911	g, r
103	30	-	-	02:00	343 - 44	13,5	5 - 39	22	Craig (CO, USA)	40,514	-107,548	g, r
104	30	-	-	20:15	335 - 8	351,5	5 - 44	24,5	Posen (POL)	52,408	16,922	g, r
105	30	-	-	19:30	283 - 325	304	5 - 37	21	Catonsville (MD, USA)	39,271	-76,734	r
106	30	19:30	-	18:30	320 - 52	62	8 - 58	33	Warrensburg (MO, USA)	38,761	-93,737	g, r
107	30	-	-	23:00	308 - 358	333	5 - 31	18	Lyndeborough (NH, USA)	42,909	-71,769	g, r
108	30	-	-	23:00	224 - 268	246	5 - 35	20	Scotland (GBR)	56,2	-4,0	g, r
109	30	19:00	-	-	350 - 61	25,5	10 - 39	24,5	Shelby (NC, USA)	35,291	-81,539	g, r
110	30	17:12	18:34	-	270 - 90	0	5 - 45	25	Rikubetsu (JPN)	43,467	143,748	-
111	31	23:30	02:00	01:23	0 - 360	0	0 - 90	90	Hannover (GER)	52,376	9,732	g, r
112	31	-	-	02:30	154 - 252	203	24 - 68	46	Hannover (GER)	52,376	9,732	g, w, r
113	31	-	-	02:00	283 - 347	315	2 - 41	21,5	Vöcklamarkt (AUT)	48,002	13,483	g, r
114	31	-	-	23:50	285 - 324	304,5	10 - 41	25,5	Wien (AUT)	48,208	16,376	r
115	31	19:30	-	-	27 - 38	32,5	12 - 40	26	Buchannon (WV, USA)	38,997	-80,232	g, r, y
116	31	-	-	18:30	32 - 81	56,5	5 - 30	17,5	Orchard Park (NY, USA)	42,767	-78,745	g, r
117	31	-	-	21:15	271 - 338	304,5	14 - 41	27,5	Hamme-Mille (BEL)	50,779	4,717	r
118	31	19:00	-	-	358 - 50	24	5 - 46	25,5	Hughesville (MD, USA)	38,532	-76,785	g, r
119	31	-	-	19:15	29 - 76	52,5	5 - 35	20	Kingsport (TN, USA)	36,549	-82,564	r
120	31	-	-	22:30	317 - 358	337,5	5 - 25	15	Mount Airy (MD, USA)	39,376	-77,154	r
121	31	-	-	18:30	57 - 119	88	5 - 59	32	Galway (NY, USA)	43,019	-74,032	g, r
122	31	-	-	19:15	309 - 351	330	5 - 26	15,5	Pittsburgh (PA, USA)	40,441	-79,999	r, cr
123	31	20:00	07:00	20:00	0 - 360	0	90 - 90	90	Anchorage (AK, USA)	61,221	-149,919	b, r
124	31	-	-	18:30	329 - 15	352	5 - 30	17,5	Farmington (NY, USA)	42,987	-77,327	g, r
125	31	-	-	00:00	292 - 41	346,5	23 - 50	36,5	Normandy (FRA)	49,0	0,3	w, r
126	31	-	-	19:00	303 - 358	330,5	5 - 39	22	Clarence (NY, USA)	42,983	-78,577	g, w, r
127	31	-	-	19:00	56 - 97	76,5	5 - 32	18,5	Sherbrooke (QC, CAN)	45,397	-71,896	g, r
128	31	-	-	21:00	46 - 93	69,5	5 - 47	26	Prince Edward Island (NB, CAN)	46,344	-63,434	g, r

TABELLE D.8: Quellen der 128 genutzten Beobachtungen des Halloween-Sturms 2003.
 “Polarlicht-Archiv” bezeichnet das Archiv von Andreas Möller, welches unter <http://www.polarlicht-archiv.de/> abrufbar ist.

Nr.	Beobachter	Quelle
1	Gerd Neumann	Polarlicht-Archiv
2	Mario Berger	Polarlicht-Archiv
3	Jost Jahn	Polarlicht-Archiv
4	Olaf Squarra	Polarlicht-Archiv
5	Wolfgang Dzieran	Polarlicht-Archiv
6	Michael Theusner	Polarlicht-Archiv
7	Wolfgang Hamburg	Polarlicht-Archiv
8	Torsten Kallweit	Polarlicht-Archiv
9	Uwe Müller	Polarlicht-Archiv
10	Sven Wienstein	Polarlicht-Archiv
11	Peter Buschkamp	Polarlicht-Archiv
12	Winfried Backhaus	Polarlicht-Archiv
13	Joachim Uhlig	Polarlicht-Archiv
14	Alexander Wünsche	Polarlicht-Archiv
15	Thomas Böhme	Polarlicht-Archiv
16	Martin Fiedler	Polarlicht-Archiv
17	Rainer Bölts	Polarlicht-Archiv
18	Harald Wochner	Polarlicht-Archiv
19	Mark Vornhusen	Polarlicht-Archiv
20	Philipp Salzgeber	Polarlicht-Archiv
21	Lutz Schenk	Polarlicht-Archiv
22	-	http://www.astronomyufo.com/Astronomy/Astronomy.htm
23	Bush	https://www.spaceweather.com/
24	Irvine	https://www.spaceweather.com/
25	Brooks	https://www.spaceweather.com/
26	Bourne	https://www.spaceweather.com/
27	Ponder	https://www.spaceweather.com/
28	Richard	https://www.spaceweather.com/
29	Cason	https://www.spaceweather.com/
30	Brown	https://www.spaceweather.com/
31	Davies	https://www.spaceweather.com/
32	Mayfield	https://www.spaceweather.com/
33	Thomas	https://www.spaceweather.com/
34	Nam	https://www.spaceweather.com/
35	Westlake	https://www.spaceweather.com/
36	Lindley	https://www.spaceweather.com/
37	Reed	https://www.spaceweather.com/
38	Bernardi	https://www.spaceweather.com/
39	Kangas	https://www.spaceweather.com/
40	Slobins	https://www.spaceweather.com/
41	Jost Jahn	Polarlicht-Archiv
42	Hartwig Luethen	Polarlicht-Archiv
43	Wolfgang Hamburg	Polarlicht-Archiv
44	Frank Jungclaus	Polarlicht-Archiv
45	Matthias Juchert	Polarlicht-Archiv
46	Daniel Ricke	Polarlicht-Archiv
47	Winfried Backhaus	Polarlicht-Archiv
48	Wolfgang Steinhoefer	Polarlicht-Archiv
49	Jan Neuhaus	Polarlicht-Archiv
50	Sven Wienstein	Polarlicht-Archiv
51	Christian Brinkmöller	Polarlicht-Archiv
52	André Walczak	Polarlicht-Archiv
53	Oliver Gottlob	Polarlicht-Archiv
54	Heinz Hovel	Polarlicht-Archiv
55	Alexander Cremer	Polarlicht-Archiv
56	Rainer Kaufhold	Polarlicht-Archiv
57	Maik Palmer	Polarlicht-Archiv
58	Peter Broich	Polarlicht-Archiv
59	Christian Harder	Polarlicht-Archiv
60	Andre Wulff	Polarlicht-Archiv
61	Björn Wargenau	Polarlicht-Archiv
62	Claudia Hinz	Polarlicht-Archiv
63	Achim Christoph	Polarlicht-Archiv
64	André Müller	Polarlicht-Archiv
65	Torsten Kallweit	Polarlicht-Archiv
66	Andreas Weller	Polarlicht-Archiv
67	Thomas Böhme	Polarlicht-Archiv
68	Martin Ergh	Polarlicht-Archiv

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

69	Norman	Polarlicht-Archiv
70	Udo Langenohl	Polarlicht-Archiv
71	Markus Pfarr	Polarlicht-Archiv
72	Josef Schäfer	Polarlicht-Archiv
73	Stefan Stumpf	Polarlicht-Archiv
74	Hans & Stanislava Zekl	Polarlicht-Archiv
75	Ulrich Rieth	Polarlicht-Archiv
76	Michael Schmidt	Polarlicht-Archiv
77	Eric von der Heyden	Polarlicht-Archiv
78	Rainer Bölts	Polarlicht-Archiv
79	Christoph Ries	Polarlicht-Archiv
80	Peter Hofmann	Polarlicht-Archiv
81	Oswald Dörwang	Polarlicht-Archiv
82	Uwe Grün	Polarlicht-Archiv
83	Harald Wochner	Polarlicht-Archiv
84	Rudolf Prinz	Polarlicht-Archiv
85	Bernhard Hubl	Polarlicht-Archiv
86	Thomas Götzfried	Polarlicht-Archiv
87	Till Credner	Polarlicht-Archiv
88	Robert Wagner	Polarlicht-Archiv
89	Stefan Felber	Polarlicht-Archiv
90	Thorsten Böckel	Polarlicht-Archiv
91	Gernot Osterloh	Polarlicht-Archiv
92	Feli	Polarlicht-Archiv
93	Erwin Filimon	Polarlicht-Archiv
94	Wilfried Wiehler	Polarlicht-Archiv
95	Rudolf Reiser	Polarlicht-Archiv
96	Mark Vornhusen	Polarlicht-Archiv
97	Alois Ortner	Polarlicht-Archiv
98	Philipp Salzgeber	Polarlicht-Archiv
99	Max Funk	Polarlicht-Archiv
100	Edwards	https://www.spaceweather.com/
101	Murdic	https://www.spaceweather.com/
102	Ewoldt	https://www.spaceweather.com/
103	Cunningham	https://www.spaceweather.com/
104	Gola	https://www.spaceweather.com/
105	Belas	https://www.spaceweather.com/
106	Winter	https://www.spaceweather.com/
107	Kierstein	https://www.spaceweather.com/
108	Cockman	https://www.spaceweather.com/
109	Clapper	https://www.spaceweather.com/
110	Nam	https://www.spaceweather.com/
111	Andreas Schulze	Polarlicht-Archiv
112	Michael Theusner	Polarlicht-Archiv
113	Hermann Koberger	Polarlicht-Archiv
114	Seidner	https://www.spaceweather.com/
115	Reyes	https://www.spaceweather.com/
116	Goller	https://www.spaceweather.com/
117	Coeckelberghs	https://www.spaceweather.com/
118	Cahn	https://www.spaceweather.com/
119	Felknor	https://www.spaceweather.com/
120	Varros	https://www.spaceweather.com/
121	Curtis	https://www.spaceweather.com/
122	Zhu	https://www.spaceweather.com/
123	Hall	https://www.spaceweather.com/
124	Atkins	https://www.spaceweather.com/
125	Trophardy	https://www.spaceweather.com/
126	Buyers	https://www.spaceweather.com/
127	Boucher	https://www.spaceweather.com/
128	Arsenault	https://www.spaceweather.com/

TABELLE D.9: Auflistung der 79 ungenutzten Sichtungen des Halloween-Sturms am 29., 30. und 31.10.2003. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, ST: Zeit nach Stellarium, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, b: blau

Nr.	Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	ST [LT]	az [°]	\bar{az} [°]	H [°]	\bar{h} [°]	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Farbe
1	29	-	-	-	-	-	-	-	Kiel (GER)	54,323	10,123	g, cr
2	29	-	-	-	-	-	-	-	Hohn (GER)	54,299	9,503	-
3	29	-	-	-	-	-	-	-	Rostock (GER)	54,083	12,100	-
4	29	-	-	-	-	-	-	-	Elmshorn (GER)	53,751	9,663	-
5	29	-	-	-	-	-	-	-	Norderney (GER)	53,707	7,156	-
6	29	-	-	-	-	-	-	-	Schwerin (GER)	53,632	11,413	-
7	29	19:00	20:00	-	330 - 30	0	-	-	Potsdam (GER)	52,389	13,060	g
8	29	-	-	-	-	-	-	-	Steinfurt (GER)	52,148	7,344	-
9	29	-	-	-	330 - 30	0	90	90	Kürten (GER)	51,053	7,263	-
10	29	-	-	-	-	-	-	-	Köln (GER)	50,938	6,960	-
11	29	21:00	21:45	-	-	-	-	-	Westerwald (GER)	50,667	7,917	-
12	29	-	-	-	-	-	-	-	Bad Honnef (GER)	50,643	7,226	-
13	29	-	-	-	-	-	-	-	Montabaur (GER)	50,436	7,826	-
14	29	-	-	-	-	-	-	-	Isny (GER)	47,695	10,042	-
15	29	01:00	01:10	-	0 - 45	22,5	-	-	Zürich (CHE)	47,369	8,539	-
16	29	-	-	-	-	-	-	-	Metochin (BC, CAN)	48,382	-123,538	g, r
17	29	-	-	-	0 - 360	0	5 - 90	47,5	Wasilla (AK, USA)	61,579	-149,441	g, r
18	29	-	-	-	-	-	-	-	Greifswald (GER)	54,087	13,389	-
19	30	-	-	-	-	-	-	-	Elmshorn (GER)	53,751	9,663	-
20	30	-	-	-	-	-	-	-	Osnabrück (GER)	52,279	8,047	-
21	30	-	-	-	-	-	-	-	Bielefeld (GER)	52,021	8,530	-
22	30	00:15	01:30	-	-	-	-	-	Bitterfeld (GER)	51,626	12,328	-
23	30	22:10	22:22	-	-	-	-	-	Warstein-Belecke (GER)	51,485	8,339	-
24	30	-	-	-	-	-	-	-	Essen (GER)	51,456	7,012	-
25	30	-	-	-	-	-	-	-	Leipzig (GER)	51,339	12,373	-
26	30	-	-	-	-	-	-	-	Altenstadt (GER)	51,275	9,194	-
27	30	-	-	-	-	-	-	-	Wuppertal (GER)	51,256	7,151	-
28	30	-	-	-	-	-	-	-	Wuppertal (GER)	51,256	7,151	r
29	30	-	-	-	-	-	-	-	Erkath (GER)	51,221	6,907	-
30	30	22:30	22:45	-	300 - 330	315	-	-	Wipperfürth (GER)	51,118	7,396	-
31	30	01:25	-	-	-	-	-	-	Gotha (GER)	50,947	10,709	-
32	30	-	-	-	-	-	-	-	Köln (GER)	50,938	6,960	-
33	30	01:00	01:30	-	-	-	-	-	Jena (GER)	50,927	11,589	y, r
34	30	20:00	00:00	-	-	-	-	-	Bad Salzigungen (GER)	50,808	10,235	r
35	30	00:40	01:00	-	-	-	-	-	Niederkassel-Rheidt (GER)	50,789	7,049	-
36	30	21:30	-	-	-	-	-	-	Stollberg (GER)	50,709	12,774	-
37	30	-	-	-	-	-	-	-	Stollberg (GER)	50,709	12,774	-
38	30	-	-	-	0 - 360	0	5 - 90	47,5	Westerwald (GER)	50,667	7,917	-
39	30	-	-	-	-	-	-	-	Bad Nauheim (GER)	50,367	8,739	r
40	30	22:00	22:40	-	0 - 60	30	-	-	Udenhain (GER)	50,316	9,333	r
41	30	-	-	-	-	-	-	-	Hanau (GER)	50,126	8,931	-
42	30	-	-	-	-	-	-	-	Frankfurt am Main (GER)	50,111	8,582	-
43	30	-	-	-	-	-	-	-				
44	30	23:34	00:19	-	-	-	-	-				

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

45	30	21:45	00:30	-	-	-	-	-	-	Frankfurt am Main (GER)	50,111	8,582	-
46	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Fichtelgebirge (GER)	50,000	12,000	r
47	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Würzburg (GER)	49,791	9,954	-
48	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Bensheim (GER)	49,686	8,619	-
49	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Erlangen (GER)	49,591	11,014	-
50	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Peterberg (GER)	49,538	6,977	g, r
51	30	21:30	00:25	-	-	-	-	-	-	Bad Mergentheim (GER)	49,489	9,770	g, r
52	30	22:20	22:40	-	-	-	-	-	-	Runding (GER)	49,216	12,762	-
53	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Karlsruhe (GER)	49,009	8,379	-
54	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Welzheim (GER)	48,874	9,632	g, r
55	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Korntal (GER)	48,846	9,107	-
56	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Stuttgart (GER)	48,775	9,182	-
57	30	22:15	21:30	-	-	-	-	-	-	Baden-Baden (GER)	48,766	8,229	r
58	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Donzdorf (GER)	48,685	9,807	-
59	30	20:00	22:30	-	-	-	-	-	-	Moosburg (GER)	48,470	11,936	g, w, r
60	30	22:09	22:40	-	-	-	-	-	-	Schwäbische Alb (GER)	48,385	9,453	-
61	30	22:40	-	-	-	-	-	-	-	Augsburg (GER)	48,371	10,898	r
62	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Traun (AUT)	48,221	14,237	-
63	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Ried (GER)	48,213	13,493	-
64	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Wien (AUT)	48,208	16,376	-
65	30	00:00	-	-	-	-	-	-	-	Wien (AUT)	48,208	16,376	-
66	30	20:30	23:30	-	240 - 300	270	-	-	-	Inning (GER)	48,076	11,150	-
67	30	-	-	-	-	-	60	-	60	Weigelsdorf (AUT)	47,943	16,408	-
68	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Dettendorf (GER)	47,824	11,968	g, r, cr
69	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Ebensee (AUT)	47,807	13,779	-
70	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Isny (GER)	47,695	10,042	g, r
71	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Rorschacherberg (CHE)	47,464	9,494	-
72	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Zürich (CHE)	47,369	8,539	-
73	30	-	-	-	0 - 360	0	90	-	90	Cap-Rouge (QC, CAN)	46,766	-71,357	r
74	30	-	-	-	-	-	-	-	-	West Babylon (NY, USA)	40,718	-73,356	g, r
75	31	-	-	-	-	-	-	-	-	Dortmund (GER)	51,571	6,985	g, r
76	31	-	-	-	-	-	-	-	-	Wageningen (GER)	51,514	7,465	g, r
77	31	-	-	-	-	-	-	-	-	Steinhuder Meer (GER)	52,473	9,338	-
78	31	-	-	-	-	-	-	-	-	Warennne (BEL)	50,697	5,253	g, r
79	31	-	-	-	0 - 0	0	90	-	90	Aberdeen (GBR)	57,149	-2,091	g,r

TABELLE D.10: Quellen der 79 ungenutzten Beobachtungen des Halloween-Sturms 2003. "Polarlicht-Archiv" bezeichnet das Archiv von Andreas Möller, welches unter <http://www.polarlicht-archiv.de/> abrufbar ist.

Nr.	Beobachter	Quelle	Nr.	Beobachter	Quelle
1	Peter Haubold	Polarlicht-Archiv	41	Thomas Sävert	Polarlicht-Archiv
2	Michael Green	Polarlicht-Archiv	42	Dietmar Bähr	Polarlicht-Archiv
3	Jörg Fenner	Polarlicht-Archiv	43	Frank Bork	Polarlicht-Archiv
4	Rainer Kracht	Polarlicht-Archiv	44	Frank M. Berger	Polarlicht-Archiv
5	Oliver Kürten	Polarlicht-Archiv	45	Peter Kuklok	Polarlicht-Archiv
6	Torsten Menz	Polarlicht-Archiv	46	Andreas Reint	Polarlicht-Archiv
7	Matthias Juchert	Polarlicht-Archiv	47	Albert Engert	Polarlicht-Archiv
8	Herman Harperink	Polarlicht-Archiv	48	Ralf	Polarlicht-Archiv
9	Bernd Pröschold	Polarlicht-Archiv	49	Frank Gieseler	Polarlicht-Archiv
10	Peter Broich	Polarlicht-Archiv	50	Philippe Grand-Montagne	Polarlicht-Archiv
11	Benjamin Kühne	Polarlicht-Archiv	51	Jens Hackmann	Polarlicht-Archiv
12	Björn Goldhausen	Polarlicht-Archiv	52	Stefan Engl	Polarlicht-Archiv
13	Christoph Prall	Polarlicht-Archiv	53	Georg Müller	Polarlicht-Archiv
14	Eric von der Heyden	Polarlicht-Archiv	54	Steffen Brückner	Polarlicht-Archiv
15	Wolfgang van Oorschot	Polarlicht-Archiv	55	Gerald Dietze	Polarlicht-Archiv
16	Heiko Rodde	Polarlicht-Archiv	56	Stefan Seip	Polarlicht-Archiv
17	Buttnor	http://www.spaceweather.com/gallery/image002152.html	57	Nathalie Dautel	Polarlicht-Archiv
18	Gillan	https://www.spaceweather.com	58	Jürgen Biedermann	Polarlicht-Archiv
19	Michael Heiß	Polarlicht-Archiv	59	Thomas Rattei	Polarlicht-Archiv
20	Rainer Kracht	Polarlicht-Archiv	60	Martin Wagner	Polarlicht-Archiv
21	Sven Lüke	Polarlicht-Archiv	61	Bernd Wisner	Polarlicht-Archiv
22	Martin Liebermann	Polarlicht-Archiv	62	Florian Kollmann	Polarlicht-Archiv
23	Manuel Schäfer	Polarlicht-Archiv	63	Anton Kellner	Polarlicht-Archiv
24	Michael Koers	Polarlicht-Archiv	64	Herfried Eisler	Polarlicht-Archiv
25	Thomas Payer	Polarlicht-Archiv	65	Wolfgang Zima	Polarlicht-Archiv
26	Anita Raute	Polarlicht-Archiv	66	Rainer Timm	Polarlicht-Archiv
27	Eyk Neidert	Polarlicht-Archiv	67	Johannes Pichler	Polarlicht-Archiv
28	Jens Wolf	Polarlicht-Archiv	68	Thomas Klein	Polarlicht-Archiv
29	Wojtek Welnowski	Polarlicht-Archiv	69	Stefan S.	Polarlicht-Archiv
30	Peter Gaydos	Polarlicht-Archiv	70	Wolfgang van Oorschot	Polarlicht-Archiv
31	Andreas Otte	Polarlicht-Archiv	71	Andreas Walker	Polarlicht-Archiv
32	Thomas Schoenstein	Polarlicht-Archiv	72	Heiko Rodde	Polarlicht-Archiv
33	Rene Winter	Polarlicht-Archiv	73	Mousette	https://www.spaceweather.com
34	Benjamin Kühne	Polarlicht-Archiv	74	Gross	https://www.spaceweather.com
35	Michael Bechmann	Polarlicht-Archiv	75	Ruesing	https://www.spaceweather.com
36	Gerhard Lampert	Polarlicht-Archiv	76	Luijting	https://www.spaceweather.com
37	Sascha	Polarlicht-Archiv	77	Achim Kämper	Polarlicht-Archiv
38	Michael Stammeler	Polarlicht-Archiv	78	Mailard	https://www.spaceweather.com
39	Martin Fiedler	Polarlicht-Archiv	79	Henderson	https://www.spaceweather.com
40	Björn Goldhausen	Polarlicht-Archiv			

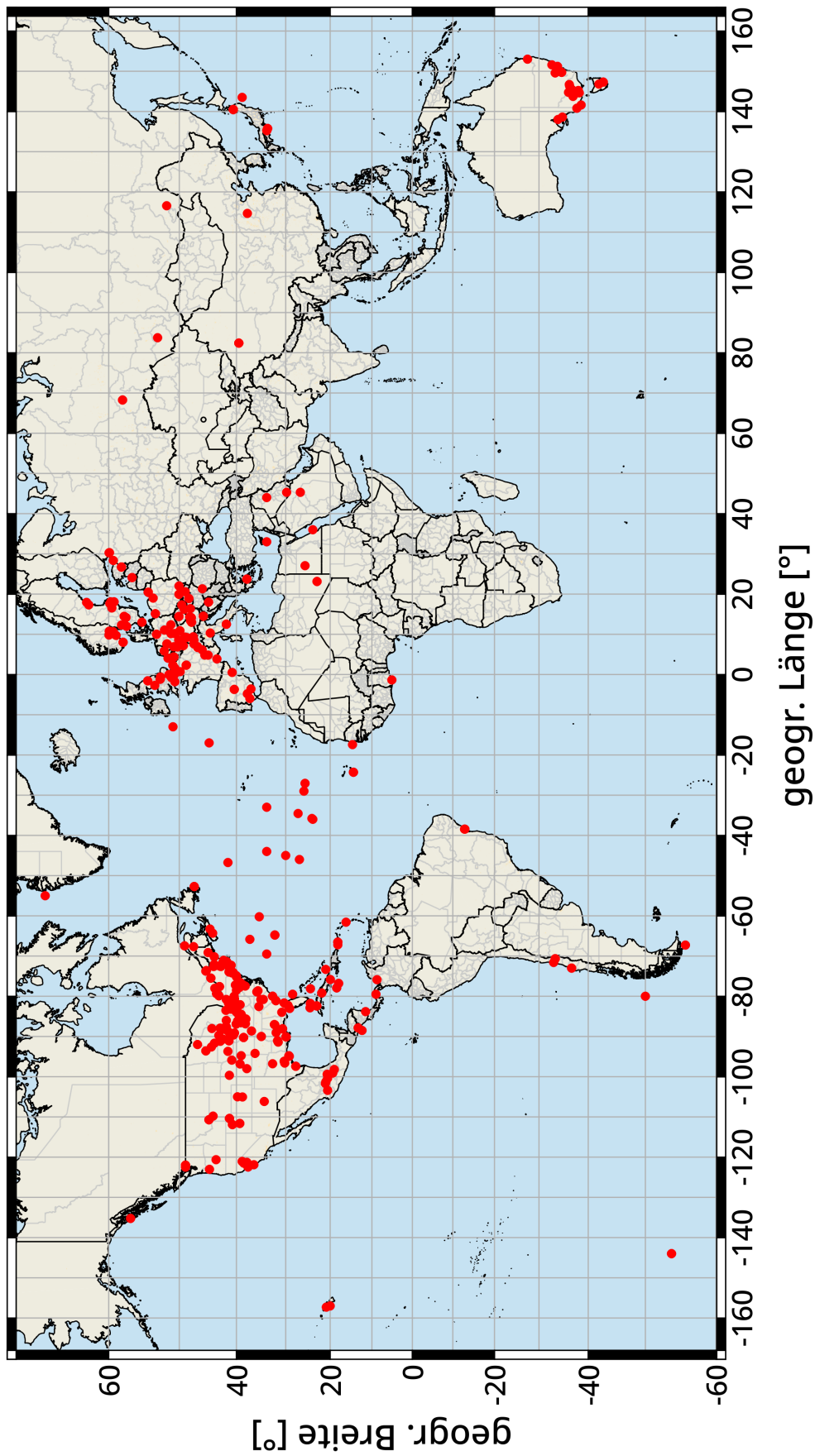


ABBILDUNG D.3: Dargestellt ist die geografische Verteilung aller 532 gefundenen Polarlichtsichtungen des Carrington-Events zwischen dem 28.08.1859 und 05.09.1859. Die Beobachtungen der Südhalbkugel werden nicht für die spätere Berechnung verwendet.

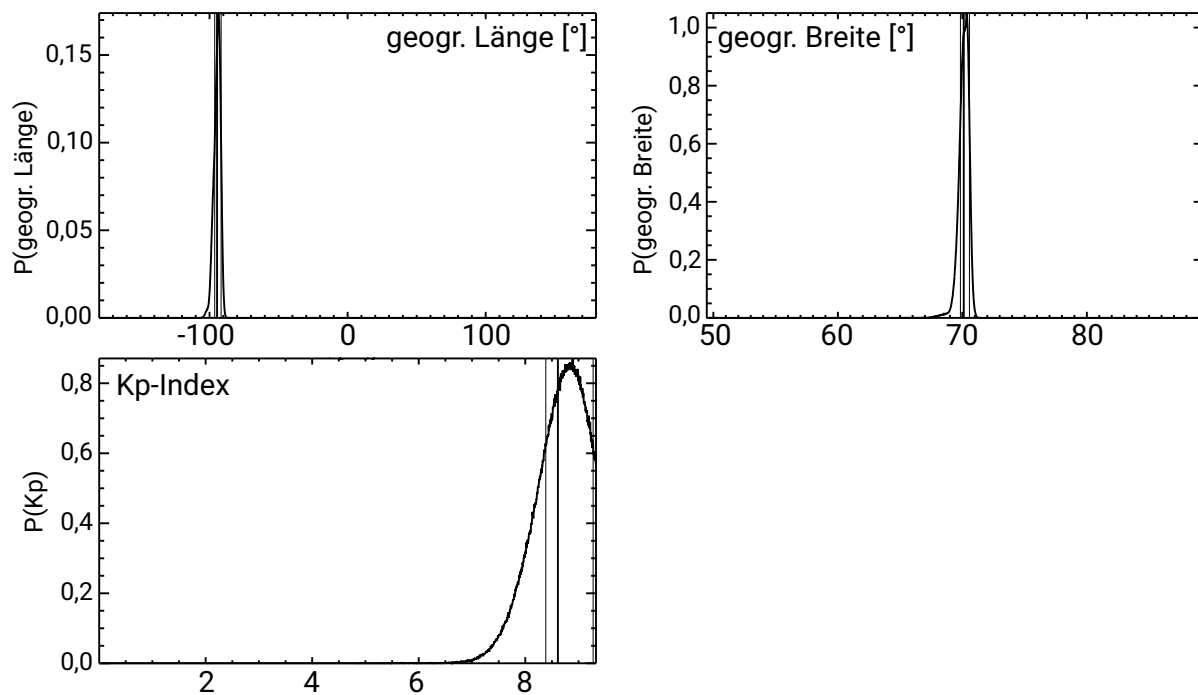


ABBILDUNG D.4: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter nach Methode 1 für August 1859.

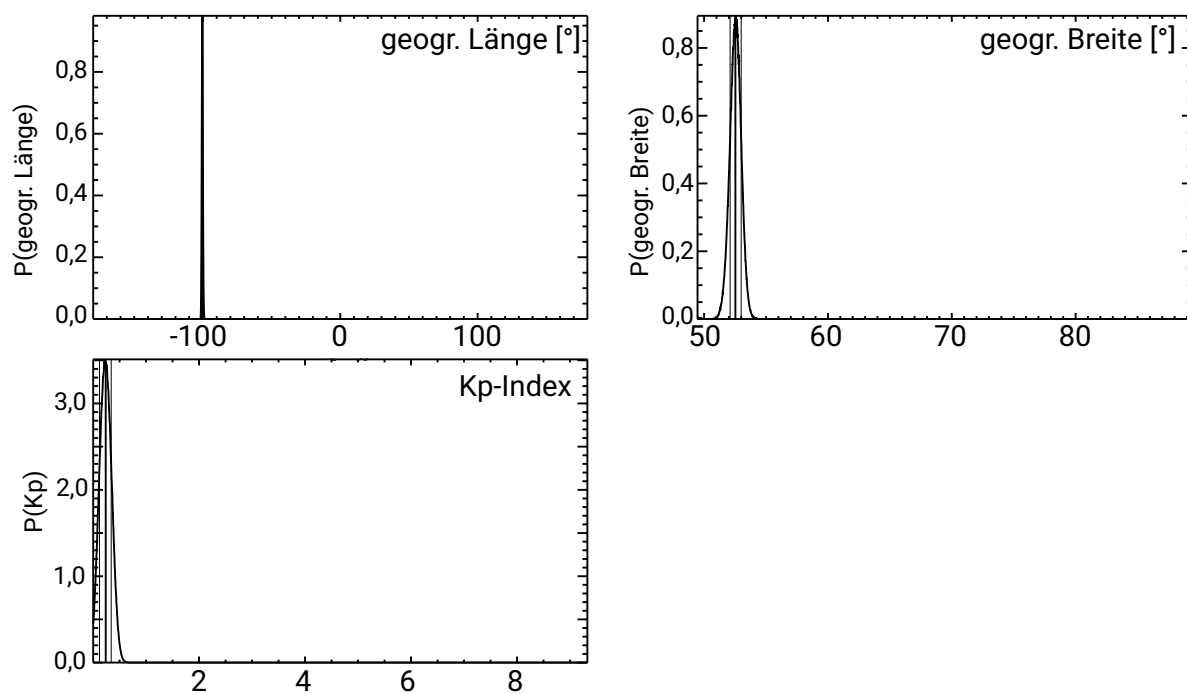


ABBILDUNG D.5: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter nach Methode 1 für September 1859.

TABELLE D.11: Auflistung der 167 verwendeten Sightungen des Carrington-Events zwischen dem 28. August und dem 05. September 1859. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. m: Morgen, e: Abend, ee: früher Abend, ss: Sonnenuntergang, sr: Sonnenaufgang, n: Nacht, t: Zwielficht, da: Morgendämmerung, d: Tageslicht, H: Horizont, Z: Zenit, Hi: Himmel, t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, bl: blau

Nr.	Monat	Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	Richtung	az [°]	\bar{az} [°]	Höhe	h [°]	\bar{h} [°]	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Farbe
1	8	28	23:00	02:45	NW - NE	315 - 45	0	bis Z	5 - 90	47,5	Bamberg (GER)	49,898	10,892	y, r
2	8	28	22:00	01:00	N - E	345 - 92	38,5	-	52	52	Oslo (NOR)	59,914	10,752	-
3	8	28	21:05	22:00	NW - NE	315 - 45	0	-	5 - 23	14	Cuba (CUB)	21,949	-79,181	r
4	8	28	20:00	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	New Orleans (LA, USA)	29,950	-90,078	-
5	8	28	00:03	07:15	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Key West (FL, USA)	24,560	-81,788	r, cr
6	8	28	20:35	-	N	270 - 90	0	Z	90	90	Providence (RI, USA)	41,824	-71,414	-
7	8	28	20:00	22:00	S	90 - 270	180	-	17	17	Newbury (NH, USA)	44,104	-72,107	r
8	8	28	19:40	07:00 (m)	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Toronto (CAN)	43,662	-79,343	-
9	8	28	19:40	23:00	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Neutra (AUT)	48,0	13,0	-
10	8	28	20:30	21:30	N - W	289 - 119	24	-	40 - 90	65	Cleveland (OH, USA)	41,497	-81,699	-
11	8	28	20:00	02:00	SE - SW	135 - 225	180	-	35 - 45	40	Hamilton (OH, USA)	43,256	-79,876	-
12	8	28	20:00	02:00	E - W	270 - 90	360	Z	90	90	Simeahmoo (CAN)	48,989	-122,773	-
13	8	28	19:19	03:00	NE - N	0 - 45	22,5	Z	90	90	West Point (NY, USA)	41,388	-73,958	-
14	8	28	20:00 (t)	05:45 (t)	NW - E	315 - 90	22,5	Z	90	90	Bloomington (IN, USA)	39,162	-86,529	-
15	8	28	21:10	04:30	N	270 - 90	0	-	5 - 80	42,5	Springhill (AL, USA)	30,703	-88,127	-
16	8	28	22:00	07:00 (m)	NW - NE	315 - 45	0	Z	90	90	San Francisco (CA, USA)	37,752	-122,448	cr
17	8	28	20:20	05:00	W - E	90 - 270	180	Z	90	90	Lewiston (ME, USA)	44,096	-70,175	-
18	8	28	20:20	-	S	90 - 270	180	Z	90	90	Montreal (CAN)	45,495	-73,633	r
19	8	28	22:00	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	St. Pascal (CAN)	47,527	-69,799	-
20	8	28	20:00	01:00	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Halifax (CAN)	44,849	-63,287	or
21	8	28	20:30	05:00 (d)	SW - N	215 - 360	287,5	-	82	82	Grafton (CAN)	43,992	-78,023	all
22	8	28	20:20	22:30	N	270 - 90	0	Z	90	90	Lunenburg (MA, USA)	42,595	-71,729	cr, go
23	8	28	19:30	07:00 (sr)	S	90 - 270	180	-	45	45	Steubenville (OH, USA)	40,371	-80,623	r
24	8	28	20:30	21:45	N	0 - 360	0	Z	90	90	Burlington (NJ, USA)	40,047	-74,854	w
25	8	28	19:30	23:00	W - E	270 - 90	0	Z	90	90	Crawfordsville (IN, USA)	40,041	-86,896	w, r
26	8	28	20:30	-	S	160 - 200	180	-	22,5	22,5	Philadelphia (PA, USA)	39,987	-75,163	-
27	8	28	21:00	-	S	160 - 200	180	-	51	51	Sandy Spring (MD, USA)	39,149	-77,026	-
28	8	28	21:00	03:00	N - NE	0 - 45	22,5	-	5 - 50	27,5	Stockton (CA, USA)	37,976	-121,295	w, r
29	8	28	21:00	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Sacramento (CA, USA)	38,583	-121,489	w, r
30	8	28	21:00	-	ges. N	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Louisville (KY, USA)	38,184	-85,656	ro
31	8	28	20:00 (e)	-	N	340 - 20	0	Z	90	90	Savannah (GA, USA)	32,083	-81,099	-
32	8	28	19:15	21:30	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Mobile (AL, USA)	30,669	-88,084	r, y
33	8	28	19:30	03:00	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Galveston (TX, USA)	29,218	-94,928	r, cr
34	8	28	19:24	22:24	ges. Hi	0 - 360	0	H - Z	5 - 90	47,5	New York (NY, USA)	40,715	-73,994	r
35	8	28	19:04	22:04	E - W	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Alexandria (VA, USA)	38,805	-77,048	ro
36	8	28	19:10	00:00	N	315 - 45	0	H - Z	5 - 90	47,5	Chicago (IL, USA)	41,881	-87,649	pi, pu
37	8	28	20:00	01:00	N - E	0 - 90	45	H - Z	5 - 90	47,5	Cincinnati (OH, USA)	39,101	-84,513	ro, r, g, y
38	8	28	19:06	22:30	WSW - ESE	247,5 - 112,5	0	H - Z	5 - 90	47,5	Yellow Springs (OH, USA)	39,807	-83,887	w, r, g
39	8	28	20:00	02:00	SE - SW	225 - 135	0	H - Z	5 - 90	47,5	New York (NY, USA)	40,715	-73,994	w, r
40	8	28	19:26	21:00	ges. N	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Cass. County (MI, USA)	41,9	-86	r
41	8	28	23:00	04:00	ges. N	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Tiffin (OH, USA)	41,115	-83,177	-
42	8	28	19:12	03:00	ges. N	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Bellow falls (VT, USA)	43,134	-72,445	blue, g, cr
43	8	28	19:30	04:30	ges. Hi	0 - 360	0	H - Z	5 - 90	47,5	Brattleboro (VT, USA)	42,851	-72,559	g, w, cr

44	8	28	19:05	22:05	ges. N	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Shepherdstown (WV, USA)	39,43	-77,804	ro
45	8	28	23:00	04:00	E	45 - 135	90	H	5 - 10	7,5	Havana (CUB)	23,102	-82,385	r
46	8	28	19:11	05:07	NW - NE	315 - 45	0	H - Z	5 - 90	47,5	Bermuda (BMU)	32,307	-64,753	y, cr
47	8	28	-	21:00	UMa - E	331,5 - 90	30,75	-	25	25	Galveston (TX, USA)	29,292	-94,821	ro
48	8	28	23:00	00:00	SW - NE	225 - 45	315	H	5 - 10	7,5	London (GBR)	51,505	-0,132	y, cr
49	8	28	21:05	22:00	ges. N	270 - 90	0	H - Z	90	47,5	Havana (CUB)	23,102	-82,385	cr
50	8	28	19:40	23:00	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	New Haven (CT, USA)	41,301	-72,932	-
51	8	28	20:45	04:20	N	0 - 0	0	Z	90	90	Havana (CUB)	23,102	-82,385	r, w
52	8	28	20:00	04:20 (m)	ges. Hi	0 - 360	0	Lyr	27,5	27,5	auf dem Meer	41,6	-46,75	cr, r
53	8	28	23:30	01:30	W - E	270 - 90	0	H	5 - 10	7,5	Madrid (ESP)	40,414	-3,703	-
54	8	28	00:00	00:00	N - S	0 - 180	0	H	5 - 10	7,5	Tortosa (ESP)	40,812	0,521	r, p
55	8	28	00:00	07:00	N	0 - 0	0	-	30	30	auf dem Meer	30	-45	r
56	8	28	00:00	06:16	N	0 - 0	0	-	80	80	Micanopy (FL, USA)	29,508	-82,281	r
57	8	28	02:11	03:11	N	0 - 0	0	Z	90	90	Calaba (AL, USA)	32,318	-87,102	-
58	8	28	02:11	04:11	N	0 - 0	0	-	20	20	Selma (AL, USA)	32,408	-87,022	-
59	8	28	03:18	04:18	N	0 - 0	0	-	20	20	Henry Co. (IN, USA)	39,927	-85,381	-
60	8	28	03:39	-	S	180 - 180	180	-	50	50	Urbana (OH, USA)	40,108	-83,752	r
61	8	28	03:52	09:52	N	0 - 0	0	Z	90	90	Washington (WA, USA)	49,0	-122,0	-
62	8	28	21:42	-	S	180 - 180	180	-	30	30	Kapunda (AUS)	-34,341	138,914	r
63	8	28	04:52	07:22	N	0 - 0	0	-	40	40	Santa Clara (CA, USA)	37,355	-121,952	-
64	8	28	21:24	-	S	180 - 180	180	-	50 - 55	50	auf dem Meer	-54,0	-144,0	r
65	8	28	-	04:51 (da)	N	0 - 0	0	-	45	45	Dallas (TX, USA)	32,774	-96,783	r
66	8	29	23:00	00:00	NW - NE	315 - 45	0	H - Z	5 - 90	47,5	London (GBR)	51,505	-0,132	r, vi
67	8	29	03:00	03:30	N	300 - 40	0	H - Z	5 - 90	47,5	Itendorf/Bodensee (GER)	47,715	9,383	r, w
68	8	29	01:00	03:00	NW - NE	315 - 45	0	θ , η Aur	33	33	Neunkirchen (GER)	49,348	7,174	r
69	8	29	02:15	02:45	ENE - S	70 - 180	125	η Dra	28	28	Paris (FRA)	45,758	4,836	r, w
70	8	29	02:00	04:00	SW - NE	225 - 45	315	Cet	32	32	Lyons (FRA)	48,855	2,337	-
71	8	29	21:00	00:00	N	360 - 360	0	6	6	6	Sineahmoo (CAN)	48,989	-122,773	-
72	8	29	02:45	04:00	W - E	270 - 90	0	Z	90	90	Crawfordsville (IN, USA)	40,041	-86,896	w, r
73	8	29	01:00	02:30	W - E	270 - 90	0	-	51	51	Frankfurt (GER)	50,117	8,676	r
74	8	29	19:47	04:13	SW - NE	225 - 45	315	-	25	25	engl. Südküste (GBR)	50,7	-1,8	-
75	8	29	00:00	-	N	315 - 45	0	Z	90	90	Muscantine (IA, USA)	41,425	-91,046	-
76	8	29	03:00	04:56	ges. N	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Galveston (TX, USA)	29,292	-94,821	ro, cr, w
77	8	29	00:00	01:00	NW - NE	315 - 45	0	H - Z	5 - 90	47,5	Kensington (GBR)	51,501	-0,195	r, vi
78	8	29	01:00	04:30	ges. Hi	0 - 360	0	H - Z	5 - 90	47,5	Havana (CUB)	23,102	-82,385	-
79	8	29	20:00	02:00	E - W	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Red Wing (MN, USA)	44,569	-92,546	r, w
80	8	29	00:00 (n)	-	N - NW	315 - 0	337,5	H	5 - 10	7,5	Madrid (ESP)	40,414	-3,703	r
81	8	31	00:00	04:53 (dl)	S	180 - 180	180	H	5 - 10	7,5	Grafton (CAN)	43,992	-78,023	cr, go, r
82	9	1	00:30	-	N	270 - 90	0	20°S Z	70	70	Toronto (CAN)	43,662	-79,343	r
83	9	1	23:00	-	NE - S	45 - 180	112,5	H - Z	5 - 90	47,5	Fort Bridger (WY, USA)	41,317	-110,385	-
84	9	1	22:00	-	NE - N	0 - 45	22,5	-	35	35	Hawaii (HI, USA)	20,896	-157,299	-
85	9	1	01:26	-	N	300 - 40	0	-	36	36	Cohe (CUB)	19,953	-75,845	-
86	9	1	22:00	08:00 (da)	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Sacramento (CA, USA)	38,583	-121,489	w
87	9	1	22:30	05:45 (d)	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Galveston (TX, USA)	29,305	-94,802	r
88	9	1	20:00	21:00	N	300 - 60	360	-	10	10	Hamilton (OH, USA)	43,253	-79,863	-
89	9	1	23:00	01:00	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Bloomington (IN, USA)	39,162	-86,529	-
90	9	1	23:00	01:00	W - E	270 - 90	0	-	5 - 60	32,5	Jefferson County (MS, USA)	31,745	-91,058	r
91	9	1	23:00	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	St. Louis (MO, USA)	38,626	-90,255	-
92	9	1	23:00	04:00	W - E	270 - 90	0	Z	90	90	New Orleans (LA, USA)	29,950	-90,078	r
93	9	1	23:00	04:00	N Hi	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Athens (OH, USA)	39,329	-82,101	r

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

94	9	1	20:00	03:00	ges. H	360 - 0	0	H	5 - 10	7,5	auf dem Meer	34	-69,5	-
95	9	1	01:00	03:00	N - E	0 - 90	45	-	45	45	Natchez (MS, USA)	31,559	-91,402	sl, r
96	9	1	01:30	04:00	N	0 - 0	0	Z	90	90	Porto Rico (USA)	18,205	-66,534	pu, r, bl
97	9	1	00:30	03:00	NW - NE	315 - 45	0	-	35	35	Sabine (NIC)	11,230	-83,820	r
98	9	1	00:00	02:00	N	0 - 0	0	-	20	20	auf dem Meer	12,5	-88,4	r
99	9	1	00:30	05:00	N	0 - 0	0	Z	90	90	Havanna (CUB)	23,102	-82,385	r, w, bl
100	9	1	05:06 (m)	-	NW - ENE	315 - 67,5	11,25	Z	90	90	auf dem Meer	24,2	-35,8	r, w
101	9	1	00:55	02:00	N	0 - 0	0	Z	90	90	Mexico City (MEX)	19,433	-99,144	w, r
102	9	1	23:40	05:45 (sr)	N	0 - 0	0	Z	90	90	Queretaro (MEX)	20,588	-100,389	r, w
103	9	1	22:45	-	E - W	270 - 90	0	Z	90	90	Zimapan (MEX)	20,738	-99,382	r, w
104	9	1	04:20	5:15	N	0 - 0	0	-	30	30	auf dem Meer	14,5	-24,3	r
105	9	1	22:00	-	N - NE	0 - 45	22,5	-	35	35	Sandwich Islands (HI, USA)	20,896	-157,299	-
106	9	1	19:47	02:47	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Salem (OR, USA)	44,942	-123,034	-
107	9	1	22:43	02:28	N	0 - 0	0	-	60	60	Bentonville (AR, USA)	36,372	-94,210	-
108	9	1	23:33	03:48	ges. Hi	180 - 180	360	Z	90	90	Jacksonville (FL, USA)	30,331	-81,679	r
109	9	1	22:32	00:32	S	0 - 360	180	-	30	30	Riley Co. (IN, USA)	39,305	-96,835	r
110	9	1	23:59	02:59	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Asheville (NC, USA)	35,596	-82,553	r
111	9	1	21:25	03:40	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Auburn (CA, USA)	38,899	-121,073	r
112	9	1	00:13	03:58	N	0 - 0	0	-	25	25	Ft. Jefferson (FL, USA)	24,629	-82,873	-
113	9	1	00:20	03:20	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Aurora (IN, USA)	39,057	-84,901	-
114	9	1	00:30	04:00	S	180 - 180	180	-	15	15	Newmark (OH, USA)	40,065	-82,416	r
115	9	1	00:00	01:00	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Stark Co. (IL, USA)	41,100	-89,787	r
116	9	1	22:33	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Utah (UT, USA)	39,359	-111,626	r
117	9	1	01:29	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Durham (NC, USA)	35,994	-78,903	r
118	9	1	01:34	02:49	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Rochester (NY, USA)	43,157	-77,612	r
119	9	1	01:11	-	N	0 - 0	0	H - Z	5 - 90	47,5	Cahaba (AL, USA)	32,318	-87,102	-
120	9	1	01:08	05:08	N	0 - 0	0	-	30	30	La Union (SLV)	13,336	-87,853	-
121	9	1	23:32	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Salt Lake City (UT, USA)	40,760	-111,899	-
122	9	1	01:00	03:45	S	180 - 180	180	-	50	50	Corpus Christie (TX, USA)	27,804	-97,409	r
123	9	1	01:42	02:42	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	New Albany (IN, USA)	38,284	-86,824	-
124	9	1	01:54	03:09	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Urbana (OH, USA)	40,108	-83,752	-
125	9	1	22:24	00:24	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	auf dem Meer	-54,0	-144,0	r
126	9	1	02:18	03:33	S	180 - 180	180	-	70	70	Paulding (MS, USA)	32,031	-89,038	-
127	9	1	18:58	22:58	S	180 - 180	180	-	60	60	Goulburn (AUS)	-34,749	149,726	r
128	9	1	02:28	04:13	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Moneka (KS, USA)	38,0	-98,0	r
129	9	1	01:30	05:00 (d)	li. α UMi	0	0 - 0	-	18	18	Guadeloupe (FRA)	16,255	-61,581	r
130	9	2	02:00	04:00	N	270 - 90	0	Z	90	90	Providence (RI, USA)	41,824	-71,414	-
131	9	2	02:00	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Newbury (NH, USA)	44,104	-72,107	r
132	9	2	19:20 (e)	03:30	S	180 - 180	180	Z	90	90	Rochester (NY, USA)	43,157	-77,612	-
133	9	2	19:45	22:30	NW - NE	315 - 45	0	-	45 - 90	67,5	Cleveland (OH, USA)	41,497	-81,699	-
134	9	2	23:45	-	NH	0 - 0	0	H	5 - 10	7,5	Melbourne (AUS)	-37,834	144,95	r
135	9	2	-	07:00 (m)	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Key West (FL, USA)	24,560	-81,788	-
136	9	2	02:00	04:00	S	180 - 180	180	-	15 - 90	52,5	Kap Horn (CHL)	-55,979	-67,275	-
137	9	2	01:00	03:00	SW - E	225 - 90	337,5	Z	90	90	Savannah (GA, USA)	32,083	-81,099	-
138	9	2	21:00	22:00	N	270 - 90	0	Z	90	90	New Haven (CT, USA)	41,301	-72,932	-
139	9	2	02:10	03:30	WSW	240 - 260	250	Z	90	90	Montreal (CAN)	45,495	-73,633	-
140	9	2	00:35	02:15	NW - NE	315 - 45	0	Z	90	90	auf dem Meer	28,5	-79,5	-
141	9	2	01:00	-	S	115 - 245	180	-	15 - 90	15	Hamilton (OH, USA)	43,253	-79,863	-
142	9	2	00:30	05:00	E - W	270 - 90	0	Z	90	90	Cuba (CUB)	21,949	-79,181	r
143	9	2	19:30	22:30	W - E	270 - 90	90	α UMi	43	43	Lunenburg (MA, USA)	42,595	-71,729	g, pu

144	9	2	00:00	03:00	W - E	270 - 90	0	Z	90	90	Mobile (AL, USA)	30,669	-88,084	pi
145	9	2	22:00	03:00	W - N	270 - 360	315	-	30	30	La Union (SLV)	13,336	-87,853	r
146	9	2	01:00	05:00	E - W	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Baltimore (MD, USA)	39,287	-76,614	r
147	9	2	00:00	04:00	gr. Teil N Hi	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Lancaster (SC, USA)	34,720	-80,772	r, y
148	9	2	00:00	04:40	ges. Hi	0 - 360	0	H - Z	5 - 90	47,5	Charlestown (OH, USA)	41,163	-81,148	r, cr
149	9	2	01:00	-	NE - NW	315 - 45	0	H - Z	5 - 90	47,5	auf dem Meer	49,15	-67,46	cr
150	9	2	22:00	-	N - E	0 - 90	45	H - Z	5 - 90	47,5	Boston (MA, USA)	42,360	-71,059	r
151	9	2	-	04:42 (m)	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	New York (NY, USA)	40,715	-73,994	y, r, o, w
152	9	2	18:57 (ee)	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Cincinnati (OH, USA)	39,101	-84,513	cr, g, p
153	9	2	20:07	21:37	N	0 - 0	0	-	45	45	Burlington (WI, USA)	42,678	-88,274	-
154	9	2	20:51	-	N	0 - 0	0	-	20	20	Carlisle (PA, USA)	40,201	-77,200	r
155	9	2	19:57	-	N	0 - 0	0	-	45	45	Davenport (IA, USA)	41,523	-90,581	r
156	9	2	19:07	-	N	0 - 0	0	-	18,5	18,5	Gardiner (MT, USA)	45,032	-110,707	-
157	9	3	20:00	22:00	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Newbury (NH, USA)	44,104	-72,107	-
158	9	3	19:40 (ss)	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Toronto (CAN)	43,662	-79,343	-
159	9	3	22:00	01:45	ganz N	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	Oslo (NOR)	59,914	10,752	-
160	9	3	21:00	23:00	NW - WNW	292,5 - 315	303,75	fast Z	85	85	Rochester (NY, USA)	43,157	-77,612	w, g, r
161	9	3	21:00	22:00	NE, N	0 - 45	22,5	Z	90	90	West Point (NY, USA)	41,388	-73,958	-
162	9	3	20:30	-	UMa - N	332 - 0	346	H - Z	5 - 90	47,5	Brod (BIH)	45,139	18,006	r
163	9	3	20:00	20:30	NW - NE	315 - 45	0	-	25,5	25,5	Laibach (SLO)	46,060	14,503	r
164	9	3	20:57	21:12	N	0 - 0	0	-	45	45	New Albany (IN, USA)	38,284	-86,824	-
165	9	3	19:32	23:32	N	0 - 0	0	-	45	45	Salt Lake City (USA)	40,760	-111,899	-
166	9	4	21:00	23:00	ges. Hi	0 - 360	0	H - Z	5 - 90	47,5	Staten Island (NY, USA)	40,579	-74,156	w, cr, ro
167	9	5	21:00	22:00	UMa	312 - 1	336,5	-	25,5	25,5	Münster (GER)	51,959	7,619	w

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

TABELLE D.12: Quellen der 167 verwendeten Sichtungen des Carrington-Events zwischen dem 28. August und dem 05. September 1859.

Nr.	Quelle	Nr.	Quelle
1	Ellner <i>Heis</i> [1859]	89	Daniel Kirkwood <i>Silliman et al.</i> [1859]
2	<i>Tromholt</i> [1902]	90	<i>Silliman et al.</i> [1859]
3	M.A. Poey <i>Silliman et al.</i> [1859]	91	St. Louis Journal <i>Silliman et al.</i> [1860a]
4	New Orleans Daily Delta <i>Silliman et al.</i> [1860a]	92	New Orleans Daily Delta <i>Silliman et al.</i> [1860a]
5	<i>Silliman et al.</i> [1860a], <i>Kimball</i> [1960]	93	The Athens post
6	Alexis Caswell <i>Lovering</i> [1868a]	94	The New York Herald
7	<i>Kimball</i> [1960]	95	The Natchez Courier
8	Kingston <i>Silliman et al.</i> [1859]	96	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
9	<i>Lovering</i> [1868a]	97	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
10	Stanard <i>Silliman et al.</i> [1860b]	98	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
11	Hurlburg <i>Silliman et al.</i> [1860b]	99	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
12	Campbell <i>Silliman et al.</i> [1860b]	100	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
13	Alexander Twining <i>Silliman et al.</i> [1859]	101	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
14	Daniel Kirkwood <i>Silliman et al.</i> [1859]	102	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
15	A. Cornette <i>Silliman et al.</i> [1859]	103	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
16	J.B. Trask <i>Silliman et al.</i> [1859]	104	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
17	Loomis <i>Silliman et al.</i> [1859]	105	Pacific Commercial Adv. <i>Silliman et al.</i> [1860b]
18	A. Hall <i>Silliman et al.</i> [1860a]	106	<i>Kimball</i> [1960]
19	C. Smallwoord <i>Silliman et al.</i> [1860a]	107	<i>Kimball</i> [1960]
20	N. Homa <i>Silliman et al.</i> [1860a]	108	<i>Kimball</i> [1960]
21	J. Hubbert <i>Silliman et al.</i> [1860a]	109	<i>Kimball</i> [1960]
22	<i>Kimball</i> [1960]	110	<i>Kimball</i> [1960]
23	Daily Journal <i>Silliman et al.</i> [1860a]	111	<i>Kimball</i> [1960]
24	B.V. Marsh <i>Silliman et al.</i> [1860a]	112	<i>Kimball</i> [1960]
25	J.L. Campbell <i>Silliman et al.</i> [1860a]	113	<i>Kimball</i> [1960]
26	C.J. Allen <i>Silliman et al.</i> [1860a]	114	<i>Kimball</i> [1960]
27	B. Hallowell <i>Silliman et al.</i> [1860a]	115	<i>Kimball</i> [1960]
28	San Joaquin Republican <i>Silliman et al.</i> [1860a]	116	<i>Kimball</i> [1960]
29	T.M. Logan <i>Silliman et al.</i> [1860a]	117	<i>Kimball</i> [1960]
30	Louisville Journal <i>Silliman et al.</i> [1860a]	118	<i>Kimball</i> [1960]
31	Savannah Republican <i>Silliman et al.</i> [1860a]	119	<i>Kimball</i> [1960]
32	Mobile Daily Register <i>Silliman et al.</i> [1860a]	120	<i>Kimball</i> [1960]
33	C.G. Forshey <i>Silliman et al.</i> [1860a]	121	<i>Kimball</i> [1960]
34	The New York Herald	122	<i>Kimball</i> [1960]
35	Alexandria Gazette	123	<i>Kimball</i> [1960]
36	The press and tribune	124	<i>Kimball</i> [1960]
37	The Cadiz Democratic sentinel.	125	<i>Kimball</i> [1960]
38	The penny press	126	<i>Kimball</i> [1960]
39	New York daily tribune	127	<i>Kimball</i> [1960]
40	The Cass County Republican.	128	<i>Kimball</i> [1960]
41	The Tiffin weekly tribune	129	L'Institut <i>Silliman et al.</i> [1860a]
42	Bellows Falls times	130	Alexis Caswell <i>Lovering</i> [1868a]
43	Vermont phoenix	131	D. Johnson <i>Lovering</i> [1868a], <i>Kimball</i> [1960]
44	Shepherdstown register	132	<i>Kimball</i> [1960]
45	The New York Herald	133	Stanard <i>Silliman et al.</i> [1860b]
46	Bermuda Royal Gazette <i>Silliman et al.</i> [1860a]	134	<i>Lovering</i> [1868a], <i>Green et al.</i> [2006]
47	Galveston News	135	<i>Silliman et al.</i> [1860a]
48	London News	136	<i>Lovering</i> [1868a]
49	The New Orleans Picayune	137	Savannah Republican <i>Silliman et al.</i> [1860a]
50	C.S. Lyman <i>Silliman et al.</i> [1859]	138	C.S. Lyman <i>Silliman et al.</i> [1859]
51	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	139	A. Hall <i>Silliman et al.</i> [1860a]
52	<i>Green et al.</i> [2006]	140	<i>Kimball</i> [1960]
53	<i>Farrona et al.</i> [2011]	141	J. Hubbert <i>Silliman et al.</i> [1860a]
54	<i>Farrona et al.</i> [2011]	142	M.A. Poey <i>Silliman et al.</i> [1859]
55	<i>Kimball</i> [1960]	143	W.B. Rogers <i>Silliman et al.</i> [1860a]
56	<i>Kimball</i> [1960]	144	Mobile Daily Register <i>Silliman et al.</i> [1860a]
57	<i>Kimball</i> [1960]	145	Gaceta del Estado <i>Silliman et al.</i> [1860a]
58	<i>Kimball</i> [1960]	146	The daily exchange
59	<i>Kimball</i> [1960]	147	The Lancaster ledger
60	<i>Kimball</i> [1960]	148	The Portage County Democrat.
61	<i>Kimball</i> [1960]	149	<i>Green et al.</i> [2006]
62	<i>Kimball</i> [1960]	150	<i>Green et al.</i> [2006]
63	<i>Kimball</i> [1960]	151	<i>Green et al.</i> [2006]
64	<i>Kimball</i> [1960]	152	<i>Green et al.</i> [2006]
65	<i>Kimball</i> [1960]	153	<i>Kimball</i> [1960]
66	The London Herald	154	<i>Kimball</i> [1960]
67	Sulzer <i>Heis</i> [1859]	155	<i>Kimball</i> [1960]
68	Lichtenberger <i>Heis</i> [1859]	156	<i>Kimball</i> [1960]
69	<i>De Monfort und Moigno</i> [1859]	157	D. Johnson (<i>Lovering</i>)
70	Goulvier-Gravier <i>Heis</i> [1859]	158	Kingston <i>Silliman et al.</i> [1859]
71	Campbell <i>Silliman et al.</i> [1860b]	159	<i>Tromholt</i> [1902]
72	J.L. Campbell <i>Silliman et al.</i> [1860a]	160	C. Dewey <i>Lovering</i> [1868a]
73	Heidelberger Tageblatt	161	Alexander Twining <i>Silliman et al.</i> [1859]
74	Fremden Blatt	162	Fremden Blatt
75	Muscatine weekly journal	163	Fremden Blatt
76	Galveston News	164	<i>Kimball</i> [1960]
77	London Herald	165	<i>Kimball</i> [1960]
78	The New Orleans Picayune	166	Wilmington journal
79	Red Wing sentinel	167	Fremden Blatt
80	<i>Farrona et al.</i> [2011]		
81	J. Hubbert <i>Silliman et al.</i> [1860a]		
82	Kingston <i>Silliman et al.</i> [1859]		
83	Ryland <i>Silliman et al.</i> [1860b]		
84	<i>Loomis</i> [1860]		
85	G.F. Allen <i>Silliman et al.</i> [1860a]		
86	T.M. Logan <i>Silliman et al.</i> [1860a]		
87	C.G. Forshey <i>Silliman et al.</i> [1860a]		
88	Hurlburg <i>Silliman et al.</i> [1860b]		

TABELLE D.13: Auflistung der 365 nicht verwendeten Sichtungen des Carrington-Events zwischen dem 28. August und dem 05. September 1859. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. m: Morgen, e: Abend, ee: früher Abend, ss: Sonnenuntergang, sr: Sonnenaufgang, n: Nacht, t: Zwielficht, da: Morgendämmerung, d: Tageslicht, H: Horizont, Z: Zenit, Hi: Himmel, t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, bl: blau

Nr.	Monat	Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	Richtung	az [°]	\bar{az} [°]	Höhe	h [°]	\bar{h} [°]	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Farbe
1	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	St. George del Mina (GHA)	5,083	-1,349	-
2	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Westküste Afrika	14,706	-17,431	-
3	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Athen (GRC)	37,983	23,728	-
4	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Montpellier (FRA)	43,613	3,868	-
5	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Parma (ITA)	44,802	10,320	-
6	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Genf (CHE)	46,206	6,146	-
7	8	28	00:00	02:30	WNW - ENE	290 - 70	0	-	-	-	Rafz (CHE)	47,611	8,542	r
8	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Neuenburg (CHE)	47,006	6,928	-
9	8	28	21:16	02:16	-	-	-	-	-	-	Schemitz (HUN)	48,453	18,905	-
10	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Wien (AUT)	48,198	16,379	-
11	8	28	00:28	01:28	-	-	-	-	-	-	Bodenbach (GER)	50,312	6,848	-
12	8	28	-	-	-	-	-	H - Z	5 - 90	47,5	Weserlingen (GER)	52,312	11,055	w, y, r
13	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Leipzig (GER)	51,329	12,362	-
14	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Naugard (POL)	53,672	15,117	-
15	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Deutschland (GER)	51,316	10,188	-
16	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Holland (NLD)	52,349	5,856	-
17	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	St. Valery (FRA)	49,862	0,714	-
18	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Novelles sur mer (FRA)	50,719	1,596	-
19	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Clifton (NJ, USA)	40,858	-74,163	-
20	8	28	01:29	-	-	-	-	Z	90	90	Brighton (GBR)	50,819	-0,138	r
21	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	auf dem Meer	25,75	27,06	-
22	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50,78	10,2	-
23	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	auf dem Meer	26,8	45,3	-
24	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29,8	45,3	-
25	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Inagua (BHS)	21,029	-73,324	r
26	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Bahamas (BHS)	24,538	-78,122	r
27	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Nordseite Jamaica (JAM)	18,467	-77,913	r
28	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Fort Bridger (WY, USA)	41,317	-110,385	-
29	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Combe-Varin (CHE)	46,966	6,711	-
30	8	28	04:33	05:33	-	-	-	-	-	-	Utah (UT, USA)	39,359	-111,626	r
31	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	-122,3	-
32	8	28	-	-	S, E	180 - 90	135	-	-	-	Cambridge (MA, USA)	42,375	-71,114	-
33	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Arad (ROU)	46,181	21,311	-
34	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Leutschau (SVK)	49,053	20,584	-
35	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Selmecbanya (SVK)	48,448	18,905	-
36	8	28	04:49	-	-	-	-	-	-	-	Rochester (NY, USA)	43,157	-77,612	-
37	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Worcester (MA, USA)	42,268	-71,805	-
38	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Maine (ME, USA)	45,182	-69,129	-
39	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Illinois (IL, USA)	40,374	-89,125	-
40	8	28	19:39	20:24	-	-	-	Z	90	90	Melbourne (AUS)	-37,834	144,95	r
41	8	28	-	-	-	-	-	-	-	-	Münster (GER)	51,957	7,611	-

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

[illegible]

[illegible]

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

142	8	29	19:20	-	S	180	180	-	-	-	Sydney (AUS)	-33,861	151,206	r
143	8	29	17:43 (pss)	für 8h	-	-	-	-	-	-	Brisbane (AUS)	-27,474	153,026	-
144	8	29	02:52	07:52	N	0	0	-	-	-	Washington (WA, USA)	49,0	-122,0	-
145	8	29	-	-	-	-	-	-	-	-	Vischel (GER)	50,463	6,966	-
146	8	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Grantham (GBR)	52,911	-0,644	-
147	8	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Grafton (CAN)	43,992	-78,023	-
148	8	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Godhaab (GRL)	59,966	9,819	-
149	8	30	-	-	NW	315	315	H	5 - 10	7,5	Altenahr (GER)	50,515	6,983	-
150	8	30	20:30	00:00	-	-	-	6	6	6	Simeahmoo (WA, USA)	48,989	-122,773	-
151	8	30	18:34	04:40	-	-	-	-	-	-	Brooklyn Heights (NY, USA)	40,696	-73,996	-
152	8	30	04:22	07:52	N	0	0	-	-	-	Washington (WA, USA)	49,0	-122,0	-
153	8	30	-	-	ges. Hi	0 - 360	0	Z	90	90	Vischel (GER)	50,463	6,966	-
154	8	31	-	-	-	-	-	-	-	-	Krakau (POL)	52,911	-0,644	-
155	8	31	-	-	-	-	-	-	-	-	Prag (CZE)	50,047	19,954	-
156	8	31	-	-	-	-	-	-	-	-	Vischel (GER)	50,065	14,422	-
157	8	31	-	-	-	-	-	-	-	-	Rochester (NY, USA)	50,463	6,966	-
158	9	1	23:30 (le)	00:00	-	-	-	-	-	-	Santiago (CHL)	43,157	-77,612	-
159	9	1	00:30	04:00	S	180	180	-	-	-	Sitka (AK, USA)	-33,434	-70,666	-
160	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Grantham (GBR)	57,167	-135,237	-
161	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Prag (CZE)	52,911	-0,644	-
162	9	1	-	00:15	-	-	-	-	-	-	Venersborg (SWE)	50,065	14,422	-
163	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,371	12,311	-
164	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Krakau (POL)	50,0886	14,4214	-
165	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Barke	50,047	19,954	-
166	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Baltimore (MD, USA)	-	-	-
167	9	1	-	-	N	0	0	-	-	-	San Salvador (SLV)	39,287	-76,614	-
168	9	1	00:26	05:26	-	-	-	-	-	-	Porto Rico (USA)	-12,956	-38,449	r
169	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Montego-bay (JAM)	18,205	-66,534	-
170	9	1	22:00	05:00	N	0	0	-	-	-	Bride	18,467	-77,913	-
171	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Kingston (JAM)	-	-	-
172	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Havanna (CUB)	18,015	-76,804	-
173	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	New Mexico (NM, USA)	23,102	-82,385	-
174	9	1	21:55	-	-	-	-	-	-	-	Montreal (CAN)	34,499	-106,159	-
175	9	1	02:20	-	-	-	-	-	-	-	-	45,495	-73,633	r
176	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-157	-
177	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,46	-24,3	-
178	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	auf dem Meer	27,3	-34,56	-
179	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	auf dem Meer	-36	-	r
180	9	1	22:00	-	-	-	-	-	-	-	Iowa (IA, USA)	41,6	-93,7	r
181	9	1	23:00	-	-	-	-	-	-	-	Charlotte (NC, USA)	35,224	-80,844	-
182	9	1	00:00	04:00	E - W	270 - 90	0	-	-	-	Boston (MA, USA)	42,360	-71,059	-
183	9	1	00:00	02:00	S	180	180	-	-	-	Concepcion (CHL)	-36,820	-73,045	r
184	9	1	02:00	05:00	S	180	180	-	-	-	Santiago (CHL)	-33,453	-70,677	bl, r, y
185	9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Valparaiso (CHL)	-33,048	-71,611	-
186	9	1	23:30	02:00	N	0	0	-	-	-	auf dem Meer	12,4	-88,5	r
187	9	1	00:00	02:00	N	0	0	20	20	20	St. Mary's (JMA)	12,5	-88,4	r
188	9	1	00:30	05:00	N	0	0	Z	90	90	Havanna (CUB)	23,102	-82,385	r, w, bl
189	9	1	23:00	00:00	-	-	-	-	-	-	Guadalajara (MEX)	20,660	-103,348	-
190	9	1	23:30	01:00	-	-	-	-	-	-	Guanaajuato (MEX)	21,019	-101,257	r
191	9	1	02:00	04:00	N	0	0	-	-	-	Mayaguez (PRI)	18,200	-67,145	r

[illegible]

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

[illegible]

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen.

342	9	3	-	-	-	-	-	-	Newmark (OH, USA)	40,065	-82,416
343	9	3	-	-	-	-	-	-	Nottingham (GBR)	52,954	-1,164
344	9	3	-	-	-	-	-	-	Pulkova (RUS)	59,419	28,352
345	9	3	-	-	-	-	-	-	Rzeszow (POL)	50,041	21,998
346	9	3	-	-	-	-	-	-	Tottenham (GBR)	51,605	-0,007
347	9	3	-	-	-	-	-	-	Urbana (OH, USA)	40,108	-83,752
348	9	4	-	-	-	Z	90	90	Oslo (NOR)	59,912	10,757
349	9	4	-	-	-	-	-	-	Toronto (CAN)	43,662	-79,343
350	9	4	-	-	-	-	-	-	Bloomington (IN, USA)	39,162	-86,529
351	9	4	-	-	-	-	-	-	Clifton (NJ, USA)	40,858	-74,163
352	9	4	-	-	-	-	-	-	Durham (NC, USA)	35,994	-78,903
353	9	4	-	-	-	-	-	-	Graatham (GBR)	52,911	-0,644
354	9	4	-	-	-	-	-	-	Naugard (POL)	53,672	15,117
355	9	4	-	-	-	-	-	-	New Haven (CT, USA)	41,301	-72,932
356	9	4	-	-	-	-	-	-	Newmark (OH, USA)	40,065	-82,416
357	9	4	-	-	-	-	-	-	Nottingham (GBR)	52,954	-1,164
358	9	4	-	-	-	-	-	-	Tottenham (GBR)	51,605	-0,007
359	9	4	-	-	-	-	-	-	Upsala (SWE)	59,858	17,638
360	9	5	N	0	0	0	-	-	Indianapolis (IN, USA)	39,771	-86,158
361	9	5	N	0	0	15	15	15	Oslo (NOR)	59,912	10,757
362	9	5	-	-	-	-	-	-	Hamburg (GER)	53,551	9,989
363	9	5	-	-	-	-	-	-	Naugard (POL)	53,672	15,117
364	9	5	-	-	-	-	-	-	Toronto (CAN)	43,662	-79,343
365	9	5	-	-	-	-	-	-	auf dem Meer	67,0	-55,0

TABELLE D.14: Quellen der 365 nicht verwendeten Sichtungen des Carrington-Events zwischen dem 28. August und dem 05. September 1859.

Nr.	Quelle	Nr.	Quelle
1	<i>Fritz</i> [1873]	89	<i>Kimball</i> [1960]
2	<i>Fritz</i> [1873]	90	<i>Kimball</i> [1960]
3	<i>Fritz</i> [1873]	91	<i>Kimball</i> [1960]
4	<i>Fritz</i> [1873]	92	<i>Kimball</i> [1960]
5	<i>Fritz</i> [1873]	93	<i>Kimball</i> [1960]
6	<i>Fritz</i> [1873]	94	<i>Kimball</i> [1960]
7	Vierteljahrsschrift Zürich (1858/59)	95	<i>Kimball</i> [1960]
8	<i>Fritz</i> [1873]	96	<i>Kimball</i> [1960]
9	<i>Kimball</i> [1960]	97	<i>Kimball</i> [1960]
10	<i>Fritz</i> [1873]	98	<i>Kimball</i> [1960]
11	<i>Kimball</i> [1960]	99	<i>Kimball</i> [1960]
12	<i>Heis</i> [1859]	100	<i>Kimball</i> [1960]
13	<i>Fritz</i> [1873]	101	<i>Kimball</i> [1960]
14	<i>Fritz</i> [1873]	102	<i>Kimball</i> [1960]
15	<i>Fritz</i> [1873]	103	<i>Kimball</i> [1960]
16	<i>Fritz</i> [1873]	104	<i>Kimball</i> [1960]
17	<i>Fritz</i> [1873]	105	<i>Kimball</i> [1960]
18	<i>Fritz</i> [1873]	106	<i>Kimball</i> [1960]
19	<i>Fritz</i> [1873]	107	<i>Kimball</i> [1960]
20	<i>Kimball</i> [1960]	108	<i>Kimball</i> [1960]
21	<i>Fritz</i> [1873]	109	<i>Kimball</i> [1960]
22	<i>Fritz</i> [1873]	110	<i>Kimball</i> [1960]
23	<i>Fritz</i> [1873]	111	<i>Kimball</i> [1960]
24	<i>Fritz</i> [1873]	112	<i>Kimball</i> [1960]
25	<i>Kimball</i> [1960]	113	<i>Kimball</i> [1960]
26	New York Journal <i>Silliman et al.</i> [1860a]	114	<i>Kimball</i> [1960]
27	New York Herald <i>Silliman et al.</i> [1860a]	115	<i>Kimball</i> [1960]
28	<i>Fritz</i> [1873]	116	<i>Fritz</i> [1873]
29	<i>Lovering</i> [1868a]	117	Alexis Caswell <i>Lovering</i> [1868a]
30	<i>Kimball</i> [1960]	118	C. Smallwood <i>Silliman et al.</i> [1860a]
31	<i>Fritz</i> [1873]	119	J. Hubbert <i>Silliman et al.</i> [1860a]
32	<i>Lovering</i> [1868a]	120	<i>Heis</i> [1859], <i>Kimball</i> [1960]
33	<i>Fritz</i> [1873]	121	<i>Heis</i> [1859]
34	<i>Fritz</i> [1873]	122	<i>Heis</i> [1859]
35	<i>Fritz</i> [1873]	123	<i>Heis</i> [1859]
36	<i>Lovering</i> [1868a], <i>Kimball</i> [1960]	124	<i>Fritz</i> [1873]
37	Merrick Bemis (27th Report of the Lunatic Asylum)	125	Merrick Bemis (27th Report of the Lunatic Asylum)
38	<i>Fritz</i> [1873]	126	Kingston <i>Silliman et al.</i> [1859]
39	<i>Lovering</i> [1868a]	127	<i>Lovering</i> [1868a]
40	<i>Lovering</i> [1868a], <i>Kimball</i> [1960]	128	Wiener Zeitung
41	<i>Lovering</i> [1868a]	129	Fremden Blatt
42	<i>Lovering</i> [1868a]	130	Die Presse
43	<i>Lovering</i> [1868a]	131	Die Presse
44	<i>Lovering</i> [1868a]	132	Wiener Zeitung
45	Charleston Mercury <i>Silliman et al.</i> [1860a]	133	The weekly north Iowa times
46	Heidelberger Tageblatt	134	The New York Herald
47	Börsen-Halle	135	<i>Green et al.</i> [2006]
48	Hamburger Nachrichten	136	<i>Green et al.</i> [2006]
49	Innsbrucker Nachrichten	137	<i>Green et al.</i> [2006]
50	Evening star	138	<i>Green et al.</i> [2006]
51	Evening star, <i>Green et al.</i> [2006]	139	<i>Green et al.</i> [2006]
52	Dayton daily empire	140	<i>Green et al.</i> [2006]
53	The Portage County Democrat.	141	<i>Green et al.</i> [2006]
54	The Bedford Gazette	142	<i>Green et al.</i> [2006]
55	Ashtabula weekly telegraph	143	<i>Green et al.</i> [2006]
56	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	144	<i>Kimball</i> [1960]
57	<i>Hayakawa et al.</i> [2018], <i>Green et al.</i> [2006]	145	<i>Kimball</i> [1960]
58	<i>Green et al.</i> [2006]	146	<i>Heis</i> [1859]
59	<i>Green et al.</i> [2006]	147	<i>Fritz</i> [1873]
60	<i>Green et al.</i> [2006]	148	<i>Kimball</i> [1960]
61	<i>Green et al.</i> [2006]	149	<i>Heis</i> [1859]
62	<i>Green et al.</i> [2006]	150	<i>Lovering</i> [1868a]
63	<i>Farrona et al.</i> [2011]	151	N. Y. Tribune
64	<i>Farrona et al.</i> [2011]	152	<i>Kimball</i> [1960]
65	<i>Farrona et al.</i> [2011]	153	<i>Kimball</i> [1960]
66	<i>Kimball</i> [1960]	154	<i>Kimball</i> [1960]
67	<i>Kimball</i> [1960]	155	<i>Kimball</i> [1960]
68	<i>Kimball</i> [1960]	156	<i>Kimball</i> [1960]
69	<i>Kimball</i> [1960]	157	<i>Kimball</i> [1960]
70	<i>Kimball</i> [1960]	158	<i>Lovering</i> [1868a]
71	<i>Kimball</i> [1960]	159	<i>Lovering</i> [1868a]
72	<i>Kimball</i> [1960]	160	<i>Lovering</i> [1868a]
73	<i>Kimball</i> [1960]	161	<i>Heis</i> [1859]
74	<i>Kimball</i> [1960]	162	Vierteljahrsschrift Zürich (1860/61)
75	<i>Kimball</i> [1960]	163	<i>Fritz</i> [1873]
76	<i>Kimball</i> [1960]	164	<i>Fritz</i> [1873]
77	<i>Kimball</i> [1960]	165	<i>Heis</i> [1859]
78	<i>Kimball</i> [1960]	166	<i>Fritz</i> [1873]
79	<i>Kimball</i> [1960]	167	<i>Fritz</i> [1873]
80	<i>Kimball</i> [1960]	168	<i>Kimball</i> [1960]
81	<i>Kimball</i> [1960]	169	<i>Fritz</i> [1873]
82	<i>Kimball</i> [1960]	170	<i>Silliman et al.</i> [1860a], <i>Kimball</i> [1960]
83	<i>Kimball</i> [1960]	171	<i>Fritz</i> [1873]
84	<i>Kimball</i> [1960]	172	<i>Fritz</i> [1873]
85	<i>Kimball</i> [1960]	173	M.A. Poey <i>Silliman et al.</i> [1860a]
86	<i>Kimball</i> [1960]	174	<i>Kimball</i> [1960]
87	<i>Kimball</i> [1960]	175	<i>Kimball</i> [1960]
88	<i>Kimball</i> [1960]	176	<i>Fritz</i> [1873]

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

Nr.	Quelle	Nr.	Quelle
177	<i>Fritz</i> [1873]	272	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]
178	<i>Kimball</i> [1960]	273	<i>Green et al.</i> [2006]
179	<i>Kimball</i> [1960]	274	<i>Green et al.</i> [2006]
180	Daily Iowa State Democrat.	275	<i>Green et al.</i> [2006]
181	The western Democrat.	276	<i>Green et al.</i> [2006]
182	Daily Iowa State Democrat.	277	<i>Green et al.</i> [2006]
183	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	278	<i>Green et al.</i> [2006]
184	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	279	<i>Green et al.</i> [2006]
185	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	280	<i>Green et al.</i> [2006]
186	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	281	<i>Green et al.</i> [2006]
187	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	282	<i>Cardenas</i> [2016]
188	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	283	<i>Kimball</i> [1960]
189	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	284	<i>Kimball</i> [1960]
190	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	285	<i>Kimball</i> [1960]
191	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	286	<i>Kimball</i> [1960]
192	<i>Kimball</i> [1960]	287	<i>Kimball</i> [1960]
193	<i>Kimball</i> [1960]	288	<i>Kimball</i> [1960]
194	<i>Kimball</i> [1960]	289	<i>Kimball</i> [1960]
195	<i>Kimball</i> [1960]	290	<i>Kimball</i> [1960]
196	<i>Kimball</i> [1960]	291	<i>Kimball</i> [1960]
197	<i>Kimball</i> [1960]	292	<i>Kimball</i> [1960]
198	<i>Kimball</i> [1960]	293	<i>Kimball</i> [1960]
199	<i>Kimball</i> [1960]	294	<i>Kimball</i> [1960]
200	<i>Kimball</i> [1960]	295	<i>Kimball</i> [1960]
201	<i>Kimball</i> [1960]	296	<i>Kimball</i> [1960]
202	<i>Kimball</i> [1960]	297	<i>Kimball</i> [1960]
203	<i>Kimball</i> [1960]	298	<i>Kimball</i> [1960]
204	<i>Kimball</i> [1960]	299	<i>Kimball</i> [1960]
205	<i>Kimball</i> [1960]	300	<i>Kimball</i> [1960]
206	<i>Kimball</i> [1960]	301	<i>Kimball</i> [1960]
207	<i>Kimball</i> [1960]	302	<i>Kimball</i> [1960]
208	<i>Kimball</i> [1960]	303	<i>Kimball</i> [1960]
209	<i>Kimball</i> [1960]	304	<i>Kimball</i> [1960]
210	<i>Kimball</i> [1960]	305	<i>Kimball</i> [1960]
211	<i>Kimball</i> [1960]	306	<i>Kimball</i> [1960]
212	<i>Kimball</i> [1960]	307	<i>Kimball</i> [1960]
213	<i>Kimball</i> [1960]	308	<i>De Monfort und Moigno</i> [1859]
214	<i>Kimball</i> [1960]	309	<i>Lovering</i> [1868a]
215	<i>Kimball</i> [1960]	310	<i>Lovering</i> [1868a]
216	<i>Kimball</i> [1960]	311	<i>Heis</i> [1859]
217	<i>Kimball</i> [1960]	312	<i>Heis</i> [1859]
218	<i>Kimball</i> [1960]	313	<i>Heis</i> [1859]
219	<i>Kimball</i> [1960]	314	<i>Heis</i> [1859]
220	<i>Kimball</i> [1960]	315	<i>Fritz</i> [1873]
221	<i>Kimball</i> [1960]	316	<i>Fritz</i> [1873]
222	<i>Kimball</i> [1960]	317	<i>Kimball</i> [1960]
223	<i>Lovering</i> [1868a]	318	<i>Fritz</i> [1873]
224	M. Bemis (27th Report of the Lunatic Asylum)	319	<i>Fritz</i> [1873]
225	Kingston <i>Silliman et al.</i> [1859]	320	<i>Fritz</i> [1873]
226	<i>Lovering</i> [1868a]	321	<i>Fritz</i> [1873]
227	<i>Lovering</i> [1868a]	322	<i>Lovering</i> [1868a]
228	<i>Lovering</i> [1868a]	323	<i>Fritz</i> [1873]
229	<i>Lovering</i> [1868a]	324	<i>Fritz</i> [1873]
230	<i>Lovering</i> [1868a]	325	<i>Fritz</i> [1873]
231	<i>Lovering</i> [1868a]	326	<i>Fritz</i> [1873]
232	<i>Lovering</i> [1868a]	327	<i>Fritz</i> [1873]
233	<i>Heis</i> [1859]	328	<i>Fritz</i> [1873]
234	<i>Heis</i> [1859]	329	J. Hubbert <i>Silliman et al.</i> [1860a]
235	<i>Heis</i> [1859]	330	Hamburger Nachrichten
236	<i>Heis</i> [1859]	331	Klagenfurter Zeitung
237	Rubenson (1882)	332	<i>Kimball</i> [1960]
238	Rubenson (1882)	333	<i>Kimball</i> [1960]
239	Rubenson (1882)	334	<i>Kimball</i> [1960]
240	<i>Kimball</i> [1960]	335	<i>Kimball</i> [1960]
241	Rubenson (1882)	336	<i>Kimball</i> [1960]
242	Rubenson (1882)	337	<i>Kimball</i> [1960]
243	Rubenson (1882)	338	<i>Kimball</i> [1960]
244	Rubenson (1882)	339	<i>Kimball</i> [1960]
245	<i>Kimball</i> [1960]	340	<i>Kimball</i> [1960]
246	<i>Fritz</i> [1873]	341	<i>Kimball</i> [1960]
247	<i>Lovering</i> [1868a]	342	<i>Kimball</i> [1960]
248	<i>Fritz</i> [1873]	343	<i>Kimball</i> [1960]
249	Bermuda Royal Gazette <i>Silliman et al.</i> [1859]	344	<i>Kimball</i> [1960]
250	Vierteljahrsschrift Zürich (1860/61)	345	<i>Kimball</i> [1960]
251	<i>Fritz</i> [1873]	346	<i>Kimball</i> [1960]
252	J. Hubbert <i>Silliman et al.</i> [1860a]	347	<i>Kimball</i> [1960]
253	Daniel Kirkwood <i>Silliman et al.</i> [1859]	348	<i>Kimball</i> [1960]
254	New York Herald <i>Silliman et al.</i> [1860a]	349	<i>Kimball</i> [1960]
255	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	350	<i>Kimball</i> [1960]
256	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	351	<i>Kimball</i> [1960]
257	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	352	<i>Kimball</i> [1960]
258	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	353	<i>Kimball</i> [1960]
259	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	354	<i>Kimball</i> [1960]
260	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	355	<i>Kimball</i> [1960]
261	Hamburger Nachrichten	356	<i>Kimball</i> [1960]
262	Wiener Zeitung	357	<i>Kimball</i> [1960]
263	The penny press	358	<i>Kimball</i> [1960]
264	Dayton daily empire	359	<i>Kimball</i> [1960]
265	Memphis daily appeal	360	<i>Kimball</i> [1960]
266	The Jeffersonian	361	<i>Kimball</i> [1960]
267	The New York Herald	362	<i>Kimball</i> [1960]
268	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	363	<i>Kimball</i> [1960]
269	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	364	<i>Kimball</i> [1960]
270	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]	365	<i>Kimball</i> [1960]
271	<i>Hayakawa et al.</i> [2018]		

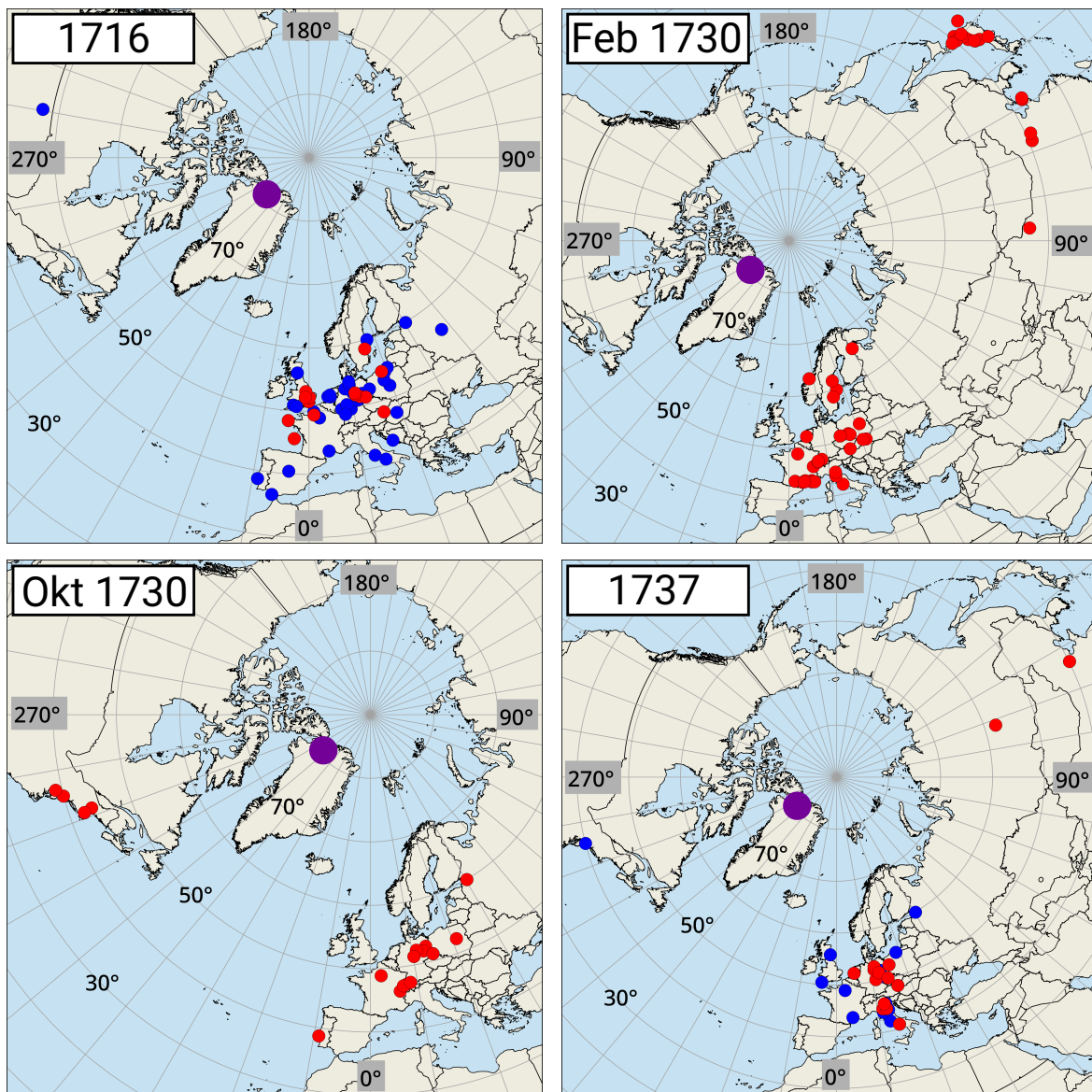


ABBILDUNG D.6: Oben links: Verteilung der 58 Beobachtungen des Geomagnetsturms 1716. Oben rechts: Verteilung der 65 Beobachtungen des Geomagnetsturms im Februar 1730. Unten links: Verteilung der 23 Beobachtungen des Geomagnetsturms im Oktober 1730. Unten rechts: Verteilung der 38 Beobachtungen des Geomagnetsturms 1737. Die genutzten Beobachtungen sind in rot dargestellt. Nicht verwendete Beobachtungen sind mit blauen Kreisen gekennzeichnet. Die Position des Geomagnetpols anhand des *gufm1* ist jeweils als violetter Kreis dargestellt.

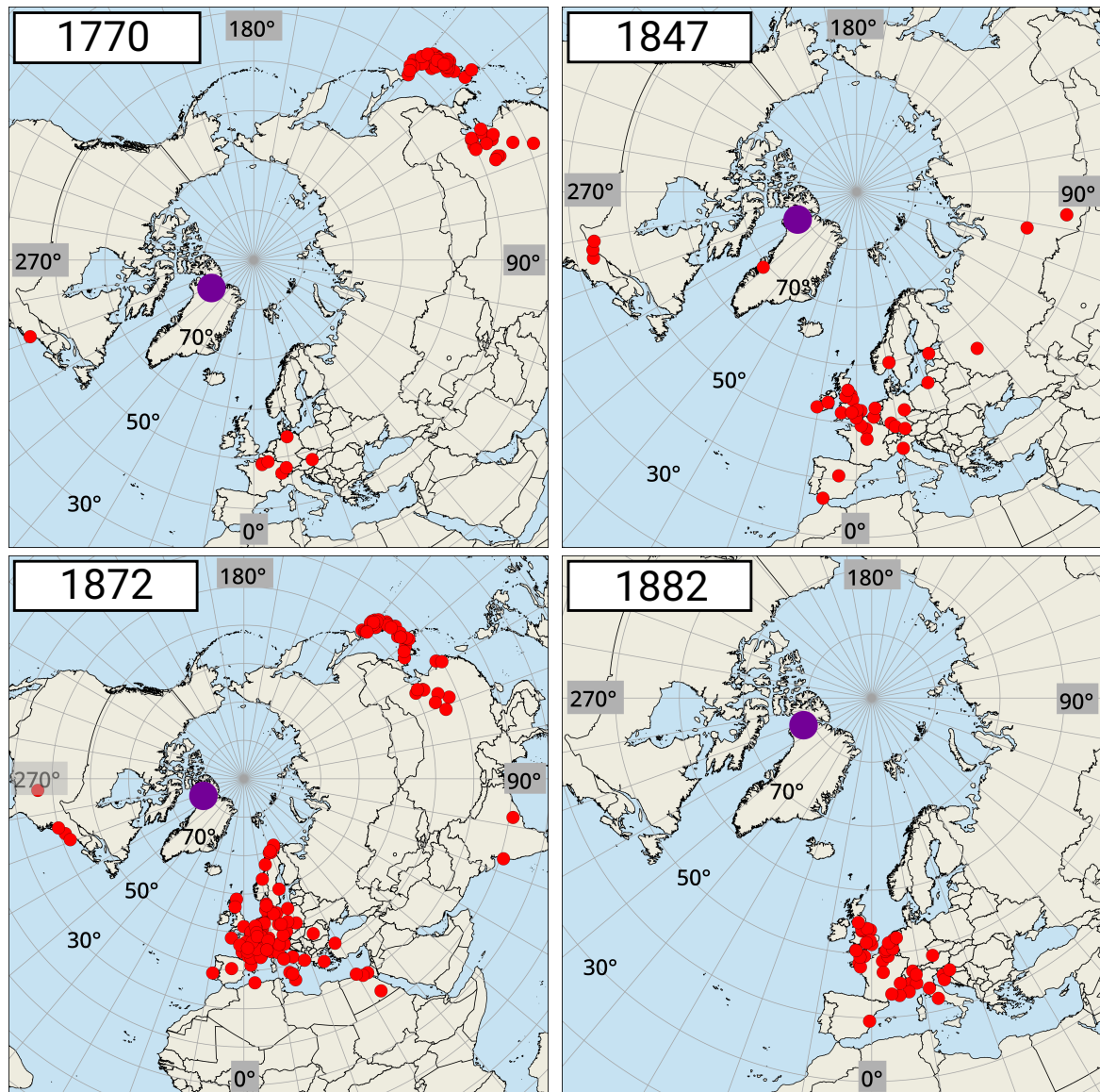


ABBILDUNG D.7: Oben links: Verteilung der 109 Beobachtungen des Geomagnetsturms 1770. Oben rechts: Verteilung der 50 Beobachtungen des Geomagnetsturms im Februar 1847. Unten links: Verteilung der 153 Beobachtungen des Geomagnetsturms im Oktober 1872. Unten rechts: Verteilung der 59 Beobachtungen des Geomagnetsturms 1882. Die genutzten Beobachtungen sind in rot dargestellt. Die Position des Geomagnetpols anhand des *gufm1* ist jeweils als violetter Kreis dargestellt.

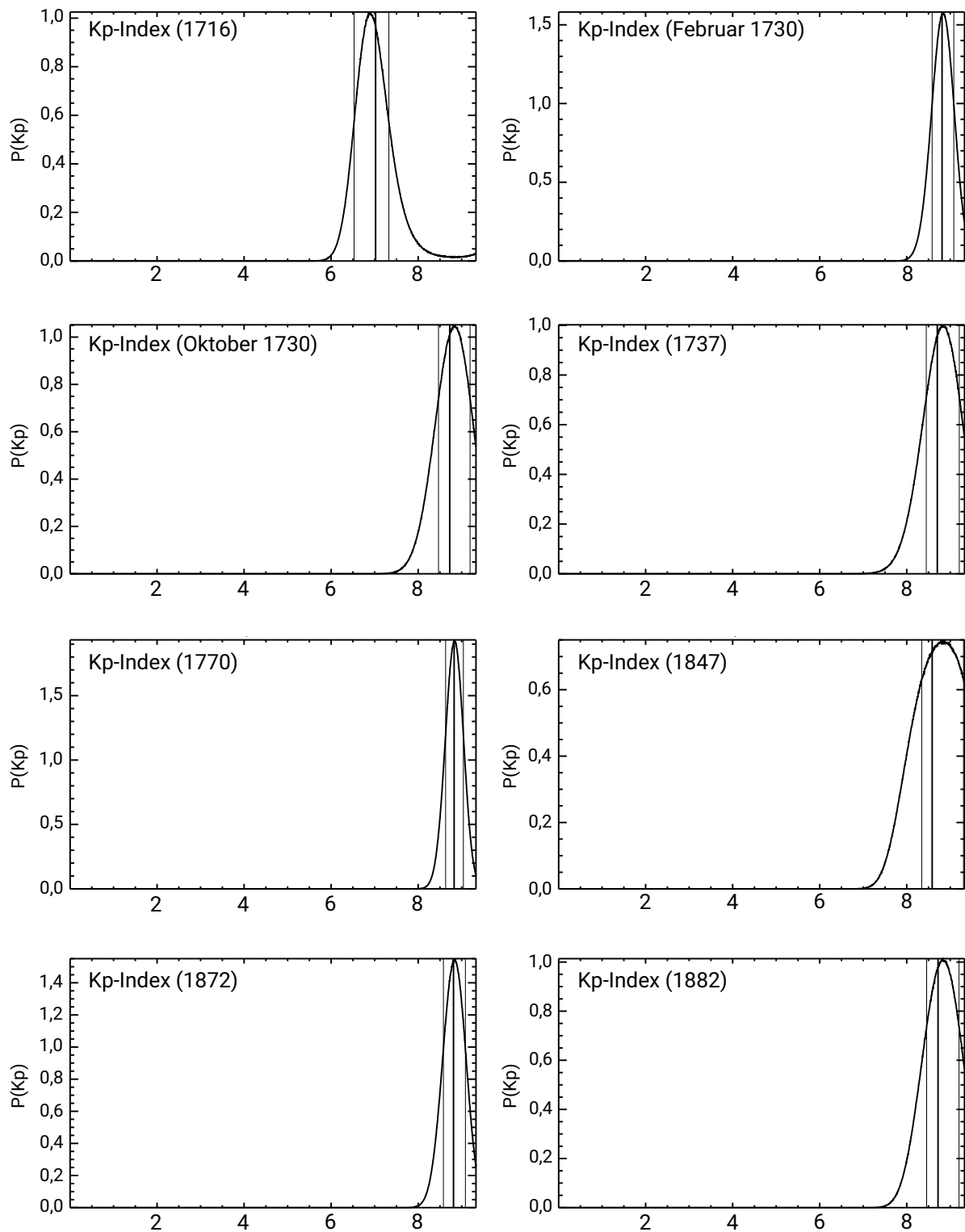


ABBILDUNG D.8: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des Kp-Index nach Methode 1 für die Geomagnetstürme zwischen 1716 und 1882.

TABELLE D.15: Auflistung der 15 verwendeten Sichtungen des Geomagnetsturms zwischen dem 15.03. und 17.03.1716. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. ss: Sonnenuntergang, pss: 1h nach Sonnenuntergang, H: Horizont, Z: Zenit, Hi: Himmel, t_s: Startzeit, t_e: Endzeit, az: Azimut, \overline{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \overline{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, w: weiß, g: grün

Tag	t _s [LT]	t _e [LT]	Richtung	az [°]	\overline{az} [°]	Höhe	h [°]	\overline{h} [°]	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quellen
16	20:15	05:15	W - E	270 - 90	0	H - Z	5 - 90	47,5	w, r	Danzig (POL)	54,353	18,639	Kirch [1716]
16	18:07 (ss)	00:00	-	345 - 65	25	-	30 - 40	35	-	Northampton (GBR)	52,240	-0,904	Philosophical Transactions [1716]
17	21:00	00:00	NNE - E	22,5 - 90	56,25	H - Z	5 - 90	47,5	-	NW Spa. Küste (ESP)	45,6	-3,0	Philosophical Transactions [1716]
17	19:00	22:00	W - NE	270 - 45	337,5	1/3 Z	5 - 33	19	-	Halle (GER)	51,497	11,966	Wolff [1716]
17	20:15	05:00	ganze Hi.	0 - 360	0	Z	90	90	r	Berlin (GER)	52,519	13,405	Kirch [1716]
17	19:00	23:00	N	0	0	bis Cas	5 - 29	17	w	Rouen (FRA)	49,443	1,010	Richard [1771]
17	19:00	23:30	W - E	270 - 90	0	-	5 - 50	27,5	w	Brest (Frau)	48,390	-4,489	Richard [1771]
17	19:00	03:00	NW - NE	315 - 45	0	H - Z	5 - 90	90	r, y, g	London (GBR)	51,505	-0,132	Halley [1716]
17	19:15	03:30	W - S	270 - 180	45	Z	5 - 90	90	r	Cambridge (GBR)	52,206	0,121	Cotes [1721]
17	19:06 (pss)	23:30	NW - N	315 - 0	337,5	-	25	25	-	Newmarket (GBR)	52,245	0,408	Richard [1771]
17	20:00	22:00	W - E	270 - 90	0	bis Z	5 - 90	90	r	Norrköping (SWE)	58,589	16,192	Celsius [1733]
17	20:00	00:00	NW - NE	315 - 45	0	-	15 - 90	52,5	r, w	Lommatzsch (GER)	51,195	13,308	Wolff [1716]
17	23:00	00:00	W - N	270 - 0	315	-	45	45	-	Halberstadt (GER)	51,895	11,049	Probestus [1739]
17	19:00	00:00	W - N	270 - 0	315	-	45	45	r	Helmstedt (GER)	52,229	11,009	Mencke et al. [1716]
17	19:30	21:00	W - E	270 - 90	0	H	5 - 10	7,5	r	Eisleben (GER)	51,520	11,554	Probestus [1739]

TABELLE D.16: Auflistung der 43 nicht verwendeten Sichtungen des Geomagnetsturms zwischen dem 15.03. und 17.03.1716. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. m: Morgen, e: Abend, n: Nacht, H: Horizont, Z: Zenit, Hi: Himmel, t_s: Startzeit, t_e: Endzeit, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, r: rot, w: weiß, y: gelb, bl: blau, g: grün

Tag	t _s [LT]	t _e [LT]	Richtung	az [°]	\bar{az} [°]	Höhe	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quelle
15	-	-	-	-	-	-	-	London (GBR)	51,505	-0,132	<i>Fritz</i> [1873]
15	04:00	-	NE	45	45	-	r, w	Solin (CRO)	43,542	16,491	<i>Richard</i> [1771]
16	-	-	-	-	-	-	-	Mark Brandenburg (GER)	52,519	13,405	<i>Beckmann</i> [1753]
16	-	-	-	-	-	-	-	Utrecht (NLD)	52,090	5,119	<i>Fritz</i> [1873]
17	-	-	-	-	-	-	-	Cadiz (ESP)	36,527	-6,289	<i>Dortours de Mairan</i> [1754]
17	-	-	-	-	-	-	-	Lissabon (PRT)	38,722	-9,140	<i>Dortours de Mairan</i> [1754]
17	-	-	-	-	-	-	-	Madrid (ESP)	40,414	-3,703	<i>Dortours de Mairan</i> [1754]
17	-	-	-	-	-	-	-	Neapel (ITA)	40,852	14,266	<i>Dortours de Mairan</i> [1754]
17	-	-	-	-	-	-	-	Rom (ITA)	41,896	12,498	<i>Dortours de Mairan</i> [1754]
17	-	-	-	-	-	-	-	Ungarn (HUN)	47,5	19,0	<i>Kanold</i> [1719]
17	-	-	-	-	-	-	-	Polen (POL)	51,9	19,5	<i>Kanold</i> [1719]
17	-	-	-	-	-	-	-	Dänemark (DNK)	55,7	12,6	<i>Kanold</i> [1719]
17	-	-	-	-	-	-	-	Schweiz (CHE)	50,0	7,4	<i>Fritz</i> [1873]
17	-	-	-	-	-	-	-	Wertheim (GER)	48,758	9,513	<i>Fritz</i> [1873]
17	-	-	-	-	-	-	-	Bierstein (GER)	50,400	9,300	<i>Fritz</i> [1873]
17	-	-	-	-	-	-	y,g,bl,r	Braunschweig (GER)	52,269	10,527	<i>Heuson</i> [1721]
17	-	-	-	-	-	-	-	Brennen (GER)	53,080	8,801	<i>Heuson</i> [1721]
17	-	-	-	-	-	-	-	Leipzig (GER)	51,339	12,373	<i>Mencke et al.</i> [1716]
17	-	-	-	-	-	-	-	Camburg (GER)	51,054	11,707	<i>Fritz</i> [1873]
17	-	-	-	-	-	-	-	Weimar (GER)	50,979	11,323	<i>Fritz</i> [1873]
17	-	-	-	-	-	-	-	Hamburg (GER)	53,551	9,989	<i>Heuson</i> [1721]
17	-	-	-	-	-	-	-	Holstein (GER)	54,1	10,0	<i>Heuson</i> [1721]
17	19:04 (e)	05:11 (n)	-	-	-	-	r	Danzig (POL)	54,353	18,639	<i>Heuson</i> [1721], <i>Kanold</i> [1720]
17	-	-	-	-	-	-	-	Torun (POL)	53,013	18,598	<i>Kanold</i> [1720]
17	-	-	-	-	-	-	-	Elbing (POL)	54,155	19,405	<i>Kirch</i> [1716]
17	-	-	-	-	-	-	-	Königsberg (GER)	50,080	10,565	<i>Kirch</i> [1716]
17	20:55	05:10 (m)	W	270	270	-	-	Holland (NLD)	52,4	5,0	<i>Heuson</i> [1721], <i>Kanold</i> [1719]
17	-	-	-	-	-	-	-	Leiden (NLD)	52,160	4,496	<i>Heuson</i> [1721]
17	-	-	-	-	-	-	-	Amsterdam (NLD)	52,366	4,893	<i>Heuson</i> [1721], <i>Probesius</i> [1739]
17	-	-	-	-	-	-	-	Paris (FRA)	48,856	2,352	<i>Fritz</i> [1873]
17	-	-	-	-	-	-	r	Languedoc (FRA)	43,384	3,628	<i>Richard</i> [1771]
17	21:00	22:00	SW - NW	225 - 315	270	-	r	Dieppe (FRA)	49,923	1,077	<i>Richard</i> [1771]
17	19:00	21:00	zum Meer	225 - 45	315	-	r	Cruwys-Morhard (GBR)	50,898	-3,604	<i>Fritz</i> [1873]
17	-	-	-	-	-	-	-	Lyme-Regis (GBR)	50,725	-2,937	<i>Folkes</i> [1723]
17	-	-	-	-	-	-	-	Schottland (GBR)	56,0	-3,1	<i>Arago</i> [1854]
17	-	-	-	-	-	-	-	Moskau (RUS)	55,767	37,605	<i>Dortours de Mairan</i> [1754]
17	-	-	-	-	-	-	-	Petersburg (RUS)	59,941	30,313	<i>Dortours de Mairan</i> [1754]
17	-	-	-	-	-	-	-	Upsala (SWE)	59,858	17,638	<i>Celsus</i> [1733]
17	-	-	-	-	-	-	-	Nord Amerika (ND, USA)	47,4	-100,3	<i>Richard</i> [1771], <i>Arago</i> [1854]
17	-	-	-	-	-	-	r	Gleken (GER)	50,584	8,676	<i>Probesius</i> [1739]
17	-	-	-	-	-	-	-	Wittenberg (GER)	51,873	12,628	<i>Probesius</i> [1739]
17	-	-	-	-	-	-	-	Frankfurt/Oder (GER)	52,348	14,549	<i>Kirch</i> [1716]
17	-	-	-	-	-	-	-	Winden (GER)	49,098	8,119	<i>Kirch</i> [1716]

TABELLE D.17: Auflistung der 65 Sichtungen des Geomagnetsturms 1730 zwischen dem 15.02. und 19.02. Die Zeitangaben sind Lokalzeit.
e: Abend, sr: Sonnenaufgang, n: Nacht, da: Morgendämmerung, d: Tageslicht, H: Horizont, Z: Zenit, Hi: Himmel, t_s: Startzeit, t_e:
Endzeit, az: Azimut, \overline{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \overline{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, w: weiß, g: grün, go: gold, p: violett, bl: blau, fc:
fünf Farben

Tag	t _s [LT]	t _e [LT]	Richtung	az [°]	\overline{az} [°]	Höhe	h [°]	\overline{h} [°]	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quellen
15	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	37,483	121,267	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	NE	45	45	-	-	-	p	-	43,600	93,033	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	02:00	N	0	0	-	-	-	r	-	39,333	112,433	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	02:00	N	0	0	-	-	-	r	-	39,333	112,433	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	02:00	N	0	0	-	-	-	r	-	39,033	114,067	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	-	-	-	-	-	-	-	fc	-	37,383	121,600	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	37,483	121,267	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	-	-	-	-	-	-	-	fc	-	37,383	121,600	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	E - N	0 - 90	45	-	-	-	-	-	36,567	142,550	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	NW	315	315	-	-	-	go	-	40,600	140,467	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	NW	315	315	-	-	-	go	-	40,600	140,467	Hayakawa et al. [2018b]
15	20:00	04:00	NW - NE	315 - 45	0	-	-	-	r	-	36,567	136,650	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	37,350	137,067	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	02:00	-	-	-	-	-	-	r	-	39,383	141,117	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	02:00	NW - NE	315 - 345	0	-	-	-	r, w	-	39,383	141,117	Hayakawa et al. [2018b]
15	18:03 (d)	6:10 (n)	-	-	-	-	-	-	-	-	40,600	140,467	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	W - NE	270 - 45	337,5	-	-	-	r	-	36,567	136,650	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	N - E	0 - 90	45	-	-	-	-	-	36,567	136,650	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	-	N	0	0	-	-	-	-	-	36,567	136,650	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	38,033	138,367	Hayakawa et al. [2018b]
15	22:00	04:00	W - E	270 - 90	0	-	-	-	r, w	-	39,717	140,117	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	S	180	180	-	-	-	-	-	40,600	140,467	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	NW	315	315	-	-	-	go	-	40,600	140,467	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	NW	315	315	-	-	-	go	-	40,600	140,467	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	NE	45	45	-	-	-	-	-	36,567	136,650	Hayakawa et al. [2018b]
15	20:00	04:00	NW - NE	315 - 45	0	-	-	-	r	-	36,567	136,650	Hayakawa et al. [2018b]
15	20:00	06:08 (da)	N	0	0	-	-	-	-	-	38,217	139,483	Hayakawa et al. [2018b]
15	20:00	-	NW	315	315	-	-	-	-	-	39,717	140,117	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	S	180	180	-	-	-	-	-	40,600	140,467	Hayakawa et al. [2018b]
15	-	-	NW - N	315 - 0	337,5	-	-	-	r	-	38,150	140,267	Hayakawa et al. [2018b]
15	20:00	05:00	N - E	0 - 90	45	-	-	-	r, w	-	37,450	137,267	Hayakawa et al. [2018b]
15	02:00	06:50 (da)	N - NNE	0 - 22,5	11,25	-	-	-	-	-	34,983	135,783	Hayakawa et al. [2018b]
15	01:00	05:00	WSW	247,5	247,5	-	-	-	-	-	41,906	12,499	Hayakawa et al. [2018b]
15	01:00	06:00	-	-	-	-	-	-	-	Rom (ITA)	43,771	11,254	Büchner [1731]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Florenz (ITA)	44,497	11,348	Büchner [1731]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bologna (ITA)	43,531	5,435	Büchner [1731]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aix (FRA)	43,610	3,878	Büchner [1731]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Montpellier (FRA)	43,344	3,216	Büchner [1731]
15	-	-	E - S	90 - 180	137	-	-	-	r, w	-	43,610	3,878	Büchner [1731]
15	19:00	-	WNW - NE	292,5 - 45	348,75	Plejadon	42 - 52	47	r, w	-	43,296	5,369	Büchner [1731]
15	-	-	-	-	-	-	61	61	r, w, p, bl	-	43,602	1,443	Büchner [1731]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Toulouse (FRA)	43,238	6,072	Büchner [1731]
15	18:00	21:15	ENE	67,5	67,5	-	4 - 5	4,5	r	-	43,384	3,628	Büchner [1731]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Languedoc (FRA)	43,384	3,628	Büchner [1731]

TABELLE D.18: Auflistung der 23 Sichtungen des Geomagnetsturms 1730 zwischen dem 20.10. und 26.10. Die Zeitangaben sind Lokalzeit.
n: Nacht, d: Tageslicht, H: Horizont, Z: Zenit, t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe,
r: rot, w: weiß

Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	Richtung	az [°]	\bar{az} [°]	Höhe	h [°]	\bar{h} [°]	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quellen
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Paris (GER)	48,855	2,348	<i>Heis</i> [1859]
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Warschau (POL)	52,231	21,010	<i>Heis</i> [1859]
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Lissabon (PRT)	38,722	-9,140	<i>Heis</i> [1859]
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Berlin (GER)	52,521	13,408	<i>Kirch</i> [1716]
20	-	-	W - E	270 - 90	0	-	-	-	r	Witttemberg (GER)	51,869	12,646	<i>Weidler</i> [1731]
20	21:00	05:40	NW - N	315 - 0	337,5	Uma	15 - 51	33	w	Helmstadt (GER)	52,228	11,013	<i>Büchner</i> [1731]
20	21:00	04:00	N - NE	0 - 45	22,5	-	-	-	r	Löbau (GER)	51,098	14,668	<i>Büchner</i> [1731]
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Petersburg (RUS)	59,939	30,312	<i>L'Isle</i> [1738]
21	23:00	04:00	N	0	0	-	-	-	r	Löbau (GER)	51,098	14,668	<i>Büchner</i> [1731]
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Deutschland (GER)	51,316	10,189	<i>Probesius</i> [1739]
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Philadelphia (PA, USA)	39,952	-75,156	<i>Heinsius</i> [1755]
22	18:00	-	-	-	-	-	-	-	-	Boston (MA, USA)	42,359	-71,063	<i>Heinsius</i> [1755]
22	-	05:50 (d)	-	-	-	-	-	-	-	New Hampshire (USA)	43,7	-71,5	<i>Heinsius</i> [1755]
22	-	-	NE	45 - 45	45	H - Z	5 - 90	47,5	-	Cambridge (MA, USA)	42,366	-71,116	<i>Stephenson et al.</i> [2019]
22	22:25	-	-	-	-	-	-	-	-	Löbau (GER)	51,098	14,668	<i>Büchner</i> [1731]
22	00:00	03:00	-	-	-	-	-	-	w	Annapolis (MD, USA)	38,970	-76,502	<i>Fritz</i> [1873]
22	18:00	05:34 (n)	N - NE	0 - 45	22,5	H - Z	5 - 90	47,5	r, w	Petersburg (RUS)	59,939	30,312	<i>L'Isle</i> [1738]
23	-	-	-	-	-	H	5 - 10	7,5	w	Bätterkinden (CHE)	47,131	7,537	?
26	20:00	-	N	0	0	-	-	-	r	Genf (CHE)	46,204	6,144	<i>Fritz</i> [1873]
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Neuenburg (CHE)	46,989	6,928	<i>Fritz</i> [1873]
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Zürich (CHE)	47,376	8,539	<i>Fritz</i> [1873]
26	23:00	03:00	NE	45	45	-	-	-	-	Löbau (GER)	51,098	14,668	<i>Büchner</i> [1731]
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Deutschland (GER)	51,316	10,189	<i>Probesius</i> [1739]

TABELLE D.19: Auflistung der 15 verwendeten Sichtungen des Geomagnetsturms zwischen dem 15.12. und 18.12.1737. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. e: Abend, sr: Sonnenaufgang, 5. W: 5. Wache, H: Horizont, Z: Zenit, Hi: Himmel, t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, az: Azimut, \overline{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \overline{h} : mittlere Höhe, r: rot, w: weiß, b: schwarz

Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	Richtung	az [°]	\overline{az} [°]	Höhe	h [°]	\overline{h} [°]	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quellen
15	21:00	22:00	ges. Hi.	0 - 360	0	ges. Hi.	5 - 90	47,5	r	Coburg (GER)	50,261	10,963	<i>Probestius</i> [1739]
16	23:00	07:58 (5. W)	W - NE	270 - 45	337,5	Nan. Berg	45	45	r, w, b	Peking (CHN)	39,909	116,408	<i>Yau et al.</i> [1995]
16	19:09	23:06	-70° - 70°	290 - 70	0	bis Z	5 - 90	47,5	r	Bologna (ITA)	44,497	11,348	<i>Aragona et al.</i> [1740]
16	18:51	02:21	W - NE	270 - 45	337,5	-	5 - 65	35	r	Neapel (ITA)	40,852	14,266	<i>Aragona et al.</i> [1740]
16	17:15	01:00	-70° - 55°	290 - 55	325,5	Z	90	90	r, w, b	Padua (ITA)	45,406	11,877	<i>Probestius</i> [1739]
16	01:30	06:00	N - NW	315 - 0	337,5	α Umi	5 - 43	24	r	Ravenna (ITA)	44,418	12,203	<i>Probestius</i> [1739]
16	17:00	08:07 (sr)	ges. Hi.	0 - 360	0	Z	90	90	r, w	Helmstedt (GER)	52,229	11,009	<i>Probestius</i> [1739]
16	16:50 (e)	-	ges. Hi.	0 - 360	0	ges. Hi.	5 - 90	47,5	r	Berlin (GER)	52,519	13,405	<i>Beckmann</i> [1753]
16	16:50 (e)	-	ges. Hi.	0 - 360	0	ges. Hi.	5 - 90	47,5	r	Salzwedel (GER)	52,850	11,162	<i>Beckmann</i> [1753]
16	16:50 (e)	-	ges. Hi.	0 - 360	0	ges. Hi.	5 - 90	47,5	r	Gralewo (POL)	52,749	15,386	<i>Beckmann</i> [1753]
16	16:50 (e)	-	ges. Hi.	0 - 360	0	ges. Hi.	5 - 90	47,5	r	Reitwein (GER)	52,502	14,581	<i>Beckmann</i> [1753]
16	17:15	01:30	-	290 - 55	352,5	-	5 - 40	22,5	r, w	Padua (ITA)	45,406	11,877	<i>Aragona et al.</i> [1740]
16	01:00	04:00	NNW - E	337,5 - 90	33,75	hoch	60	60	-	Kirensk (RUS)	57,775	108,124	<i>Fritz</i> [1873]
16	21:00	22:00	ges. Hi.	0 - 360	0	ges. Hi.	5 - 90	47,5	r	Tschechien (CZE)	50,100	14,400	<i>Krivsky und Pejml</i> [1988a]
18	18:00	23:00	16°	-8 - 8	0	16°	5 - 21	13,0	r	Utrecht (NLD)	52,090	5,119	<i>Louering</i> [1868a]

TABELLE D.20: Auflistung der 23 nicht verwendeten Sichtungen des Geomagnetsturms zwischen dem 15.12. und 20.12.1737. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. m: Morgen, e: Abend, n: Nacht, H: Horizont, Z: Zenit, t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, r: rot

Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	Richtung	az [°]	\bar{az} [°]	Höhe	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quelle
15	16:00	05:57 (n)	W	270	270	-	r	Utrecht (NLD)	52,090	5,119	Musschenbroek [1739]
16	-	-	-	-	-	-	-	Lissabon (PRT)	38,722	-9,140	Fritz [1873]
16	16:57	00:00	-	-	-	-	-	Plymouth (GBR)	50,376	-4,144	Huzham [1738]
16	-	-	-	-	-	-	-	Rom (ITA)	41,896	12,498	Frobesius [1739]
16	-	-	-	-	-	-	-	Florenz (ITA)	43,771	11,254	Frobesius [1739]
16	-	-	-	-	-	-	-	Mailand (ITA)	45,464	9,189	Frobesius [1739]
16	02:00	-	-	-	-	-	-	Venedig (ITA)	45,443	12,317	Frobesius [1739]
16	-	-	-	-	-	-	-	Wien (AUT)	48,208	16,376	Pilgram [1788]
16	-	-	-	-	-	-	-	Sachsen (GER)	51,1	13,4	Fritz [1873]
16	-	-	-	-	-	-	-	Meißen (GER)	51,162	13,497	Fritz [1873]
16	-	-	N	330 - 30	0	-	-	Annaberg (GER)	50,579	13,006	Grundig [1750]
16	-	-	-	-	-	-	-	Schneeberg (GER)	50,597	12,641	Fritz [1873]
16	-	-	-	-	-	-	-	Wittenberg (GER)	51,873	12,628	Dortours de Mairan [1754]
16	-	-	-	-	-	-	-	Duisburg (GER)	51,432	6,759	Fritz [1873]
16	-	-	-	-	-	-	-	Polen (POL)	51,900	19,500	Frobesius [1739]
16	16:45 (e)	07:15 (m)	W - SW	225 - 270	247,5	-	r	Danzig (POL)	54,353	18,639	Bock [1783]
16	19:00	21:15	NW	315 - 315	315	-	r	Utrecht (NLD)	52,090	5,119	Musschenbroek [1739]
16	18:30	19:30	-	-	-	29,5	-	Paris (FRA)	48,856	2,352	Dortours de Mairan [1754]
16	19:00	19:00	-	-	-	17	-	Montpellier (FRA)	43,610	3,878	Dortours de Mairan [1754]
16	-	-	-	-	-	-	-	Nörtl. England (GBR)	55,800	-2,000	Dortours de Mairan [1754]
16	-	-	N	-	-	-	r	Petersburg (RUS)	59,941	30,313	Musschenbroek [1739]
16	-	-	-	-	-	-	-	Zwickau (GER)	50,710	12,469	Wetterchronik Zwickau [2019]
20	17:26 (e)	-	S - SW	180 - 225	202,5	-	r	Philadelphia (PA, USA)	39,987	-75,163	Breintnall [1740]

TABELLE D.21: Auflistung der 109 Sichtungen des Geomagnetsturms 1770 zwischen dem 10.09. und 18.09. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. ss: Sonnenuntergang, sr: Sonnenaufgang, e: Abend, H: Horizont, Z: Zenit, t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, az: minimaler Azimut, AZ: maximaler Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, fc: fünf Farben y: gelb, cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, bl: blau

Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	Richtung	az [°]	\bar{az} [°]	Höhe	h [°]	\bar{h} [°]	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quellen
10	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,517	135,783	Hayakawa et al. [2017]
11	20:00	0:00	-	-	-	-	-	-	r	-	36,833	112,85	Hayakawa et al. [2017]
13	18:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	40,617	140,467	Hayakawa et al. [2017]
13	22:00	02:00	-	-	-	-	-	-	r	-	34,567	133,233	Hayakawa et al. [2017]
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38,433	141,3	Hayakawa et al. [2017]
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38,433	141,3	Hayakawa et al. [2017]
15	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	36,117	112,867	Hayakawa et al. [2017]
16	-	-	-	-	-	-	-	-	fc	-	39,883	118,867	Hayakawa et al. [2017]
16	-	-	-	-	-	-	-	-	fc	-	39,75	118,75	Hayakawa et al. [2017]
16	-	-	-	-	-	-	-	-	fc	-	40,033	117,417	Hayakawa et al. [2017]
16	-	-	-	-	-	-	-	-	fc	-	39,717	119,167	Hayakawa et al. [2017]
16	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	37,267	118,883	Hayakawa et al. [2017]
16	00:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	34,767	138	Hayakawa et al. [2017]
16	-	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,1	138,867	Hayakawa et al. [2017]
16	22:00	00:00	-	-	-	-	-	-	r	-	-10,45	112,817	Hayakawa et al. [2017]
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cambridge (MA, USA)	-71,116	Lovering [1868a]	
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	36,183	116,767	Hayakawa et al. [2017]
17	-	00:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,5	117,633	Hayakawa et al. [2017]
17	-	02:00	-	-	-	-	-	-	w	-	36,183	116,767	Hayakawa et al. [2017]
17	-	00:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	36,183	116,783	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	00:00	-	-	-	-	-	-	r	-	36,533	113,05	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	35,5	117,633	Hayakawa et al. [2017]
17	-	02:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	28,85	112,617	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	37,183	119,933	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	02:00	-	-	-	-	-	-	r	-	32,6	114,383	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	35,017	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	18:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,017	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	22:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,567	138,567	Hayakawa et al. [2017]
17	-	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	35,5	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	-	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	35,017	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	35,017	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	16:00	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,7	139,75	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	35,017	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	35,017	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	02:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,7	139,75	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,5	134,233	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	00:00	-	-	-	-	-	-	-	-	37,35	137,067	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	41,433	140,117	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,183	136,9	Hayakawa et al. [2017]
17	18:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	35	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	18:04 (ss)	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	35,7	139,75	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	00:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	34,683	135,533	Hayakawa et al. [2017]
17	-	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,017	135,767	Hayakawa et al. [2017]

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

17	18:45 (e)	02:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	34,517	135,85	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,567	137,45	Hayakawa et al. [2017]
17	22:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,817	135,433	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,817	135,65	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	33,733	135,383	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,683	135,533	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34,767	136,133	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34,75	135,533	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	fc	-	37,383	138,833	Hayakawa et al. [2017]
17	18:00	06:00	-	-	-	-	-	-	r, p	-	34,683	135,533	Hayakawa et al. [2017]
17	18:04 (ss)	-	-	-	-	-	-	-	r, p	-	35,083	138,917	Hayakawa et al. [2017]
17	22:00	02:00	-	-	-	-	-	-	r, go	-	34,867	137,817	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	37,917	140,1	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	33,683	130,783	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,55	135,8	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	33,733	135,983	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,6	135,75	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,6	135,8	Hayakawa et al. [2017]
17	18:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	34,517	135,85	Hayakawa et al. [2017]
17	18:04 (ss)	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,383	136,933	Hayakawa et al. [2017]
17	18:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	35,433	137,133	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	38,05	139,4	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,967	138,933	Hayakawa et al. [2017]
17	22:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,767	137,4	Hayakawa et al. [2017]
17	00:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,767	137,383	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	34,767	137,383	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	38,65	141,183	Hayakawa et al. [2017]
17	22:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	38,433	140,317	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	36,567	136,667	Hayakawa et al. [2017]
17	19:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	37,5	140,45	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38,417	141,3	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	P, r, w, y	-	31,717	131,067	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	39,433	140,767	Hayakawa et al. [2017]
17	00:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	41,433	140,117	Hayakawa et al. [2017]
17	18:00	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	34,8	134,983	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	37,833	139,217	Hayakawa et al. [2017]
17	-	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	35,183	136,9	Hayakawa et al. [2017]
17	18:04 (ss)	00:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	34,867	134,55	Hayakawa et al. [2017]
17	-	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	34,983	134,967	Hayakawa et al. [2017]
17	22:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	35,317	137,933	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	36,867	140,417	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	36,867	140,417	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r, fc	-	39,45	140,367	Hayakawa et al. [2017]
17	18:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	34,583	136,533	Hayakawa et al. [2017]
17	22:00	02:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	35,183	136,9	Hayakawa et al. [2017]
17	18:45 (e)	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r, w	-	39,7	141,15	Hayakawa et al. [2017]
17	18:45 (e)	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	r	-	35,033	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	21:00	-	-	-	-	-	-	-	r	-	34,967	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	18:00	04:00	-	-	-	-	-	-	r, w	-	34,283	135,567	Hayakawa et al. [2017]
17	18:04 (ss)	-	-	-	-	-	-	-	r	-	35,017	135,767	Hayakawa et al. [2017]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	40,617	140,467	Hayakawa et al. [2017]
17	20:00	02:00	-	-	-	-	-	-	r	-			

17	02:00	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	-	35,7	139,75	<i>Hayakawa et al.</i> [2017]
17	18:00	05:45 (sr)	-	-	-	-	-	-	-	r	-	-	40,617	140,467	<i>Hayakawa et al.</i> [2017]
17	21:00	03:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40,007	116,419	<i>Cotte</i> [1774]
17	21:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48,198	16,379	<i>Richard</i> [1771]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46,779	7,533	<i>Wieniger</i> [1853]
17	20:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47,753	8,933	<i>Hoslin</i> [1784]
17	19:00	-	-	315 - 135	45	85	fast Z	85	85	w	-	-	53,864	10,687	<i>Behn</i> [1783]
17	19:30	-	270	270	270	5 - 90	bis Z	47,5	47,5	-	-	-	48,989	2,322	<i>Cotte</i> [1774]
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48,855	2,348	<i>Cotte</i> [1774]
17	20:15	21:00	NNW	337,5	337,5	80	80	80	80	r, w	-	-	49,349	4,069	<i>Richard</i> [1771]
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	-	37,167	112,483	<i>Hayakawa et al.</i> [2017]
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	-	37,533	116,533	<i>Hayakawa et al.</i> [2017]
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	-	37,167	112,483	<i>Hayakawa et al.</i> [2017]
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	r, w	-	-	35,35	137,383	<i>Hayakawa et al.</i> [2017]
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	fc	-	-	34,75	135,533	<i>Hayakawa et al.</i> [2017]
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	-	35,017	135,767	<i>Hayakawa et al.</i> [2017]

TABELLE D.22: Auflistung der 50 Sichtungen des Geomagnetsturms 1847 zwischen dem 22.10. und 29.10. Die Zeitangaben sind Lokalzeit.
m: Morgen, e: Abend, ee: früher Abend, ss: Sonnenuntergang, sr: Sonnenaufgang, n: Nacht, t: Zwielficht, da: Morgendämmerung, d:
Tageslicht, H: Horizont, Z: Zenit, t_s : Startzeit, t_e : Endzeit, az: Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb,
cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, bl: blau

Tag	t_s [LT]	t_e [LT]	Richtung	az [°]	\bar{az} [°]	Höhe	h [°]	\bar{h} [°]	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quellen
22	16:00	-	-	-	-	-	-	-	-	Toronto (CAN)	43,662	-79,343	Fritz [1873]
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Parma (ITA)	44,802	10,328	Mohl et al. [1849]
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Brüssel (BEL)	50,849	4,351	Mohl et al. [1849]
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Christiania (NOR)	59,914	10,752	Fritz [1873]
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Barnaul (RUS)	53,358	83,77	Fritz [1873]
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cazenovie(NY,USA)	42,93	-75,855	Hough [1855]
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Rochester (NY,USA)	43,158	-77,608	Hough [1855]
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Toronto (CAN)	43,662	-79,343	Mohl et al. [1849]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cadiz (ESP)	36,527	-6,289	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Parma (ITA)	44,802	10,328	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Spanien (ESP)	40,655	-3,6	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Mannheim (GER)	49,485	8,469	Fritz [1873]
24	22:00	23:00	NNE, SW, W	259 - 267	263	Altair	9,5 - 22,5	16	w, r, y	Leipzig (GER)	51,329	12,362	Heis [1859]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Brüssel (BEL)	50,849	4,351	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Paris (FRA)	48,855	2,349	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bourges (FRA)	47,08	2,397	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Amsterdam (NLD)	52,382	4,896	Fritz [1873]
24	18:15	02:00	SW - N - E	225 - 90	337,5	H - Z	5 - 90	47,5	r, w, g, y	Cambridge (GBR)	52,205	0,121	Morgan [1848]
24	18:30	00:00	SW - N	225 - 0	292,5	H - Z	5 - 90	47,5	g, w, cr	Durham (GBR)	54,775	-1,586	Morgan [1848]
24	21:30	23:00	-220	332,5 - 52,5	192,5	22° - Z	22 - 90	68	r, w	York (GBR)	53,959	-1,087	Morgan [1848]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Swansea (GBR)	51,621	-3,943	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Blackheath (GBR)	51,466	0,001	Morgan [1848]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Mount Eagle (GBR)	52,117	-10,433	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Oxford (GBR)	51,751	-1,259	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Ipswich (GBR)	52,056	1,147	Fritz [1873]
24	22:00	-	-	-	-	-	-	-	-	Greenwich (GBR)	51,487	0,001	Morgan [1848]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	London (GBR)	51,504	-0,126	Fritz [1873]
24	21:45	-	-	-	-	bis Z	5 - 90	47,5	-	Ireland (IRL)	53,181	-7,705	Mohl et al. [1849]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Danse	-	-	Fritz [1873]
24	23:07	-	Korona	0 - 360	0	Korona	90	90	-	Makerstoun (GBR)	55,587	-2,525	Edinburgh [1850]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Christiania (NOR)	59,914	10,752	Fritz [1873]
24	19:40	20:00	-	-	-	-	bis Z	47,5	90	Moskau (RUS)	55,757	37,616	Mohl et al. [1849]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Baltischport (EST)	59,355	24,052	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Barnaul (RUS)	53,358	83,77	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bogoslavsk (RUS)	59,8	78,06	Fritz [1873]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Rochester (NY,USA)	43,158	-77,608	Hough [1855]
24	03:00	-	-	-	-	-	-	-	-	Toronto (CAN)	43,662	-79,343	Fritz [1873]
24	20:45	21:25	-	-	-	-	-	-	-	Grassmere (GBR)	54,460	-3,024	Morgan [1848]
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kaliningrad (RUS)	54,706	20,511	Polarlicht-Archiv
24	01:00	01:00	-	-	-	-	-	-	r, w	Württemberg (GER)	48,778	9,366	Mohl et al. [1849]
25	21:40	22:25	NW - NE	315 - 45	0	-	-	-	-	Rouen (GBR)	49,441	1,1	Fritz [1873]
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Christiania (NOR)	59,914	10,752	Fritz [1873]

TABELLE D.23: Auflistung der 153 Sichtungen des Geomagnetsturms 1872 zwischen dem 30.01. und 06.02. Die Zeitangaben sind Lokalzeit. m: Morgen, e: Abend, ee: früher Abend, ss: Sonnenuntergang, sr: Sonnenaufgang, n: Nacht, t: Zwielficht, da: Morgendämmerung, d: Tageslicht, H: Horizont, Z: Zenit, Hi: Himmel, t_s: Startzeit, t_e: Endzeit, \bar{az} : Azimut, \bar{az} : mittlerer Azimut, h: Höhe, \bar{h} : mittlere Höhe, r: rot, y: gelb, cr: purpur, or: orange, w: weiß, g: grün, go: gold, pi: pink, p: violett, bl: blau

Tag	t _s [LT]	t _e [LT]	Richtung	az [°]	\bar{az} [°]	Höhe	h [°]	\bar{h} [°]	Farbe	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quellen
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Volpeglino (ITA)	44,892	8,959	<i>Priz</i> [1873]
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	London (GBR)	51,494	-0,090	<i>Priz</i> [1873]
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Thurso (GBR)	58,593	-3,521	<i>Priz</i> [1873]
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Svanholmsminde (DNK)	56,859	10,091	<i>Priz</i> [1873]
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Svanholmsminde (DNK)	56,859	10,091	<i>Priz</i> [1873]
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Upsala (SWE)	59,858	17,636	<i>Priz</i> [1873]
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Modena (ITA)	44,646	10,923	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Algier (DZA)	36,737	3,095	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Mumbai (IND)	19,076	72,874	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Assuan (EGY)	24,090	32,899	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Raikote (IND)	19,001	81,828	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Suez (EGY)	29,979	32,565	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cairo (EGY)	30,047	31,234	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Malta (MLT)	35,892	14,451	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Constantinopel (TUR)	41,008	28,990	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Alexandrien (EGY)	31,203	29,923	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Athen (GRC)	37,986	23,727	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Palermo (ITA)	38,117	13,359	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Rom (ITA)	41,906	12,499	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Genua (ITA)	44,405	8,953	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Florenz (ITA)	43,771	11,254	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Lissabon (PRT)	38,721	-9,141	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Madrid (ESP)	40,419	-3,715	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Barcelona (ESP)	41,382	2,178	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Moncalieri (ITA)	44,999	7,680	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Lesina (ITA)	41,863	15,353	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Triest (ITA)	45,648	13,777	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sicilien (ITA)	37,587	14,060	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Otrando (ITA)	40,144	18,492	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aosta (ITA)	45,735	7,313	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Grenoble (FRA)	45,189	5,724	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Montpellier (FRA)	43,610	3,878	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bordeaux (FRA)	44,837	-0,575	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Toulouse (FRA)	43,602	1,443	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Carcassone (FRA)	43,212	2,355	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sarlat (FRA)	44,892	1,215	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Greasque (FRA)	43,431	5,544	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Muges (FRA)	43,239	5,365	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Pola	-	-	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Hermannstadt (ROU)	45,797	24,141	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Zürich (CHE)	47,376	8,539	<i>Priz</i> [1873]
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Genf (CHE)	46,204	6,144	<i>Priz</i> [1873]

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

[illegible]

Kapitel D. Übersicht über die verwendeten Polarlichtkataloge und Beobachtungen

TABELLE D.24: Auflistung der 59 Sichtungen des Geomagnetsturms zwischen dem 12.11. und 20.11.1882. In keinem der Fälle wurden die Originalquellen bisher untersucht. Daher stehen außer Datum und Ort keine weiteren Informationen zur Verfügung.

Tag	Ort	Breite [°]	Länge [°]	Quelle
12	Stonyhurst (GBR)	53,848	-2,47	<i>Angot</i> [1897]
12	York (GBR)	53,959	-1,087	<i>Angot</i> [1897]
12	Silloth (GBR)	54,869	-3,389	<i>Angot</i> [1897]
12	Atlantik	-	-	<i>Angot</i> [1897]
13	Stonyhurst (GBR)	53,848	-2,47	<i>Angot</i> [1897]
13	Bolton (GBR)	53,577	-2,428	<i>Angot</i> [1897]
13	York (GBR)	53,959	-1,087	<i>Angot</i> [1897]
13	Atlantik	-	-	<i>Angot</i> [1897]
14	Stonyhurst (GBR)	53,848	-2,47	<i>Angot</i> [1897]
14	York (GBR)	53,959	-1,087	<i>Angot</i> [1897]
14	Atlantik	-	-	<i>Angot</i> [1897]
16	York (GBR)	53,959	-1,087	<i>Angot</i> [1897]
17	Rom (ITA)	41,906	12,499	<i>Angot</i> [1897]
17	Florenz (ITA)	43,771	11,254	<i>Angot</i> [1897]
17	Moncalieri (ITA)	44,999	7,680	<i>Angot</i> [1897]
17	Volpeglino (ITA)	44,892	8,959	<i>Angot</i> [1897]
17	Nizza (Frau)	43,71	7,261	<i>Angot</i> [1897]
17	Marseilles (FRA)	43,296	5,368	<i>Angot</i> [1897]
17	Grenoble (FRA)	45,189	5,724	<i>Angot</i> [1897]
17	Valenzia (ESP)	39,469	-0,377	<i>Angot</i> [1897]
17	Montpellier (FRA)	43,610	3,878	<i>Angot</i> [1897]
17	Paris (FRA)	48,855	2,348	<i>Angot</i> [1897]
17	Laon (FRA)	49,563	3,622	<i>Angot</i> [1897]
17	Cherbourg (FRA)	49,632	-1,619	<i>Angot</i> [1897]
17	Saint-Brieuc (FRA)	48,514	-2,766	<i>Angot</i> [1897]
17	Ploermel (Frau)	47,929	-2,397	<i>Angot</i> [1897]
17	Douai (Frau)	50,367	3,081	<i>Angot</i> [1897]
17	Guernsey (Frau)	49,457	-2,585	<i>Angot</i> [1897]
17	Torquay (GBR)	50,461	-3,525	<i>Angot</i> [1897]
17	Greenwich (GBR)	51,487	0,001	<i>Angot</i> [1897]
17	Osborne (GBR)	50,532	-3,601	<i>Angot</i> [1897]
17	Oxford (GBR)	51,751	-1,259	<i>Angot</i> [1897]
17	Hull (GBR)	53,767	-0,327	<i>Angot</i> [1897]
17	Hallifax (GBR)	53,726	-1,857	<i>Angot</i> [1897]
17	Stonyhurst (GBR)	53,848	-2,47	<i>Angot</i> [1897]
17	York (GBR)	53,959	-1,087	<i>Angot</i> [1897]
17	Silloth (GBR)	54,869	-3,389	<i>Angot</i> [1897]
17	Brüssel (BEL)	50,849	4,351	<i>Angot</i> [1897]
17	Bourges (Frau)	47,08	2,397	<i>Angot</i> [1897]
17	Tournai (BEL)	50,603	3,386	<i>Angot</i> [1897]
17	Antwerpen (NLD)	51,517	4,405	<i>Angot</i> [1897]
17	Belgien (BEL)	50,675	4,795	<i>Angot</i> [1897]
17	Utrecht (NLD)	52,09	5,121	<i>Angot</i> [1897]
17	Zieriksee (NLD)	51,65	3,918	<i>Angot</i> [1897]
17	Holland (NLD)	52,349	5,856	<i>Angot</i> [1897]
17	Schweiz (CHE)	46,851	8,509	<i>Angot</i> [1897]
17	Fiume (CRO)	45,329	14,439	<i>Angot</i> [1897]
17	Pola (CRO)	-	-	<i>Angot</i> [1897]
17	Lussinpiccolo (CRO)	44,539	14,449	<i>Angot</i> [1897]
17	Zagreb (CRO)	45,815	15,98	<i>Angot</i> [1897]
17	Roveredo (CHE)	46,233	9,128	<i>Angot</i> [1897]
17	Böhm	-	-	<i>Angot</i> [1897]
17	Aicha (GER)	48,673	13,289	<i>Angot</i> [1897]
17	Atlantik	-	-	<i>Angot</i> [1897]
18	Torquay (GBR)	50,461	-3,525	<i>Angot</i> [1897]
18	Cardington (GBR)	52,117	-0,413	<i>Angot</i> [1897]
18	Atlantik	-	-	<i>Angot</i> [1897]
20	Oxford (GBR)	51,751	-1,259	<i>Angot</i> [1897]
20	Atlantik	-	-	<i>Angot</i> [1897]

Literaturverzeichnis

- Akasofu, S.I., Chapman, S. (1961). The Ring Current, Geomagnetic Disturbance, and the Van Allen Radiation Belts . *J. Geophys. Res.*, Volume 66, Issue 5, pp. 1321–1350.
- Akasofu, S.I. (2009). The Northern Lights: Secrets of the Aurora Borealis. *Alaska Northwest Books*
- Allen, J., Frank, L., Sauer, H., Reiff, P. (1989). Effects of the March 1989 solar activity. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Volume 70, Issue 46, p. 1479–1488.
- Anders (2019). Understand Aurora Borealis Coronas. <https://auroraborealisobservatory.com/news/understand-aurora-borealis-coronas/>, abgerufen am: 26.02.2020.
- Angot, A. (1897). The Aurora Borealis. *D. Appleton und Co.*
- Arago, F. (1854). Franz Arago's sämtliche Werke - Band 4. *Leipzig*, 1854.
- Aragona, N.M., Poleni, M., Zanotti, E., De Revillas, D., Fuller, J. (1740). A collection of the observations of the remarkable red lights seen in the air on Dec. 5. 1737. Sent from different places to the Royal Society. *Philosophical Transactions*, Volume 41, Issue 459.
- Arlt, R., Leussu, R., Giese, N., Mursula, K., Usoskin, I.G. (2013). Sunspot positions and sizes for 1825 - 1867 from the observations by Samuel Heinrich Schwabe. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 000, 1–8.
- Balch, C., Crown, M.D., Viereck, R. (2004). Overview of Space Weather, Space Weather Forecasts, and System Impacts During the High Activity from 19 October through 7 November 2003. *American Astronomical Society Meeting 204, Bulletin of the American Astronomical Society*, Volume 36, p. 670.
- Barnard, E.E. (1902). Observations of the Aurora Made at the Yerkes Observatory, 1897–1902. *Astrophysical Journal*, Volume 16, p. 135.

- Barnard, E.E. (1910). Observations of the Aurora Made at the Yerkes Observatory, 1902–1910. *Astrophysical Journal*, Volume 31, p. 208.
- Bartels, J., Heck, N.H., Johnston, H.F. (1939). The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, Volume 44, Issue 4, p. 411.
- Basurah, H.M. (2004). Auroral evidence for early high solar activities. *Solar Physics*, 225: 209–212.
- Bayes, T. (1764). An Essay Toward Solving a Problem in the Doctrine of Chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Volume 53, pp. 370–418.
- Beckmann, J.C. (1753). Historische Beschreibung der Chur und Mark Brandenburg. *Voß, Berlin*, 1753.
- Behn, F.D. (1783). Beschreibung einiger merkwürdiger Nordlichter. *Basel*, 1783.
- Bekli, M.R., Chdaou, I. (2019). Analysis of pre-telescopic sunspots and auroras from 8th to 16th century. *Advances in Space Research*, Volume 46, Issue 4, pp. 1011–1018
- Bloxham, J., Jackson, A. (1992). Time-dependent mapping of the magnetic field at the core-mantle boundary. *J. Geophys. Res.*, Volume 97, no. B13, p. 19, 53–19, 563.
- Bock, F.S. (1783). Versuch einer wirthschaftlichen Naturgeschichte von dem Königreich Ost- und Westpreußen. *Dessau*.
- Bond, W. C., Bond, G. P., Winlock, J., Pickering, E. C. (1898). Meteorological Observations made during the years 1840 to 1888 inclusive, Chapter III. Observations of Aurora Borealis. *Annals of Harvard College Observatory*, Volume 19, pp. 50–104.
- Bone, N. (1996). The Aurora - Sun-Earth Interactions 2nd Edition. *John Wiley and Sons Ltd*.
- Borovsky, J.E., Birn, J., Echim, M.M., Fujita, S., Lysak, R.L., Knudsen, D.J., Marghitu, O., Otto, A., Watanabe, T., Tanaka, Ta. (2019). Quiescent Discrete Auroral Arcs: A Review of Magnetospheric Generator Mechanisms. *Space Science Reviews*, Volume 216, Issue 1.
- Boteler, D.H. (2019). A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm. *Space Weather*, Volume 17, Issue 10, pp. 1427–1441.

- Breintnall, J. (1740). Notices of some meteors observed at Philadelphia in North-America by Joseph Breintnall, extracted out of a letter from him to Peter Collinson, F. R. S. *Philosophical Transactions*, Volume 41, Issue 456.
- Brett, R. M. (1976). The current status of speculations on the composition of the core of the earth. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Volume 14, p. 375–383.
- Broughton, P. (2002). Auroral records from Canada 1769 – 1821. *J. Geophys. Res.*, Volume 107, Issue A8.
- Brown, T.M., Christensen-Dalsgaard, J. (1998). Accurate Determination of the Solar Photospheric Radius. *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 500, No 2.
- Büchner, A.E. (1731). Miscellanea physico-medico-mathematica, oder Nachrichten von physikal- und medicinischen auch dahin gehörigen Kunst- und Literatur-Geschichten etc. *Erfurt*, 1731 - 1734.
- Bushby, P., Mason, J. (2004). Understanding the solar dynamo. *Astronomy and Geophysics*, Volume 45, Issue 4.
- Campbell, E.P. (2004). An introduction to physical-statistical modelling using Bayesian methods. *CSIRO Mathematical and Information Sciences*, http://www.ioci.org.au/publications/cat_view/16-ioci-stage-2/34-technical-papers.html, abgerufen am: 19.01.2020.
- Carbary, J.F. (2005). A Kp-based model of auroral boundaries. *Space Weather*, Vol. 3, Issue 10.
- Moreno Cárdenas, F., Cristancho Sánchez, S., Vargas Domínguez, S. (2016). The grand aurorae borealis seen in Colombia in 1859. *Advances in Space Research*, Volume 57, Issue 1, p. 257–267.
- Carrington, R.C., (1859). On the distribution of the solar spots in latitude since the beginning of the year 1854; with a map. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 19, 1–3.
- Carrington, R.C., (1859). On certain phenomena in the motions of solar spots. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 19, 80–83.
- Carrington, R.C. (1860). Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 20, 13–14.
- Celsius, A. (1733). Observationes de lumine Boreali : ab A. MDCCXVI. ad A. MDC-CXXXII. partim a se, partim ab aliis, in Suecia habitas. *Endter, Norimberga*, 1733.

- Chisham, G., Abel, G., Milan, S. (2004). Whose field line is it anyway?. *Astronomy und Geophysics*, Volume 45, Issue 3.
- Clette, F., Svalgaard, L., Vaquero, J.M., Cliver, E.W. (2014). Revisiting the Sunspot Number. *Solar and Stellar Astrophysics*, Volume 186, p. 35–103.
- Clette, F., Vaquero, J.M., Cruz Gallego, M., Lefèvre, L. (2020). Sunspot and Group Number: Recent advances from historical data. *Astronomy in Focus XXX, presented at IAU XXX General Assembly, Vienna, Austria. Proceedings of the IAU, 2020*, pp. 156–159.
- Cliver, E.W., (2006). The 1859 space weather event: Then and now. *Advances in Space Research*, Volume 38, Issue 2, p. 119–129.
- Cliver, E.W., Dietrich, W.F. (2013). The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. *Journal of Space Weather and Space Climate*, Volume 3, id.A31, 15 pp.
- Constable, C., Korte, M., Panovska, S. (2016). Persistent high paleosecular variation activity in southern hemisphere for at least 10 000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 453, p. 7–86.
- Cotes, R. (1721). A description of the great meteor which was on the 6th of March, 1716 sent in a letter from the late Reverend Mr. Roger Cotes, Plumian Professor at Cambridge, to Robert Danyne, D. D . Rector of Spofforth Yorkshire. *Philosophical Transactions*, Volume 31, Issue 365.
- Cotte, L. (1774). Traité de météorologie. L’histoire des observations météorologiques. *Paris*, 1774.
- D’Agostini, G. (2003). Bayesian inference in processing experimental data: principles and basic applications. *Reports on Progress in Physics*, Volume 66, Issue 9, pp. 1383–1419.
- Dalton, J. (1834). Meteorological Observations and Essays. *Harrison und Crosfield*.
- Danielides, M.A., Kozlovsky, A. (2001). Auroral Vortex Structures as a Result of Disturbed Geomagnetic Conditions. *COSPAR Colloquia Series*, Volume 11, pp. 503–506.
- Delaygue, G., Bard, E. (2011). An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium. *Climate Dynamics*, Volume 36, No. 11, p. 2201–2218.
- De Monfort, M.B.R., Moigno, M. (1859). Cosmos Revue encyclopédique hebdomadaire des progrès.des sciences. Tome 1 - XXV, Paris 1859.

- Department of Defense (1991). World Geodetic System 1984. Its definition and relationships with local geodetic systems. *US Government, Department of Defense, Rockville, MD, 1991*.
- Dormann, C.F. (2019). Bayesscher Anhang zu: Parametrische Statistik - Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R. *Springer Spektrum*.
- Dortours de Mairan, J.J. (1731). Traite physique et historique de l'aurore boreale. *Paris, 1731*.
- Dortours de Mairan, J.J. (1754). Traite physique et historique de l'aurore boreale. *Paris, 1754*.
- Dziewonski, A. M., Anderson, D. L. (1981). Preliminary reference Earth model *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volume 25, Issue 4, p. 297–356.
- Transactions of the Royal Society of Edinburgh (1850). *Edinburgh*, Volume 19.
- Elphinstone, R. D., Murphree, J. S., Cogger, L. L. (1996). What is a global auroral substorm? *Reviews of Geophysics*, Volume 34, Issue 2, p. 169–232.
- Emmert, J.T., Richmond, A.D., Drob, D.P. (2010). A computationally compact representation of Magnetic-Apex and Quasi-Dipole coordinates with smooth base vectors. *J. Geophys. Res.*, 115 (A8).
- Farrona, A.M.M., Gallego, M.C., Vaquero, J.M., Dominquez-Castro, F. (2011). Spanish eyewitness account of the great space weather event of 1859. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, Volume 46, Issue 3, 370–377.
- Fear, R.C., Milan, S. E., Maggiolo, R., Fazakerley, A. N., Dandouras, I., Mende, S. B. (2014). Direct observation of closed magnetic flux trapped in the high-latitude magnetosphere. *Science*, Volume 346, Issue 6216, pp. 1506–1510.
- Feldstein, Y.I. (1964). Auroral morphology, I. The location of the auroral zone. *Tellus*, Volume 16, Issue 2, p.252.
- Folkes, M. (1723). Observationes aurorae borealis per quadriennium factae, lennea regis in Norfolciâ, Ex epistolâ observatoris ad Martinum Folkes, Arm. Reg. Soc. Vice Praes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Volume 32, Issue 376.
- Fritz, H. (1873). Verzeichnis beobachteter Polarlichter. C. Gerold's Sohn (Wien)

- Frobesius, J.N. (1739). Nova et antiqua luminis atque Aurorae borealis spectacula. *Helmstädt*, 1739.
- Fuller-Rowell, T.J., Evans, D.S. (1987). Height-integrated Pedersen and Hall conductivity patterns inferred from the TIROS-NOAA satellite data. *J. Geophys. Res.*, Volume 92, Issue A7.
- Geddes, M. (1940). Catalogue of aurora australis displays, 1931-1938. *Wellington, N.Z.: Carter Observatory*.
- Gohlke, P. (1847). Aristoteles: Meteorologie, herausgegeben, übertragen und in ihrer Entstehung erläutert von Paul Gohlke. *Reprint, Paderborn 1955*.
- Greely, A.W. (1881). Chronological list of auroras observed from 1870 to 1879. *Professional Papers Signal Service, U.S.A., No. 3, pp. 7*.
- Green, J.L., Boardsen, S., Odenwald, S., Humble, J., Pazamickas, K.A. (2006). Eyewitness reports of the great auroral storm of 1859. *Advances in Space Research*, Volume 38, Issue 2, pp. 145–154.
- Grundig, C.G. (1750). Neue Versuche nützlicher Sammlungen zur Natur- und Kunst-Geschichte, sonderlich von Ober-Sachßen. *Richter, Altenburg*.
- Gubbins, D., Herrero-Bervera, E. (2007). Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Springer (Dordrecht).
- Gussenhoven, M.S., Hardy, D.A., Heinemann, N. (1983). Systematics of the Equatorward Diffuse Auroral Boundary. *J. Geophys. Res.*, 88, 5692.
- Halley, E. (1716). An account of the late surprizing appearance of the lights seen in the air, on the sixth of March last ; with an attempt to explain the principal phaenomena thereof. *Philosophical Transactions*, Volume 29, Issue 347.
- Hamacher, D.W. (2013). Aurorae in Australian Aboriginal Traditions. *Journal of Astronomical History and Heritage*, Volume 16, No. 2, p. 207–219.
- Hanslmeier A. (2007). The sun and space weather - 2nd Edition. *Astrophysics and space science library*, Springer, Dordrecht.
- Hanslmeier, A., Roudier, Th., Rieutord, M., Muller, R. (2009). Solar Convection Dynamics Derived from Long Time Series Observations. *Central European Astrophysical Bulletin*, Volume 33, pp. 39 – 50.

- Hanslmeier A. (2010). The Sun and Space Weather. In: Gopalswamy N., Hasan S., Ambastha A. (eds), *Heliophysical Processes. Astrophysics and Space Science Proceedings*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Harrison, G. (2005). Harrison: Aurorae: Aurora diaries. *Astronomy and Geophysics*, Volume 46, pp. 4.31–4.34.
- Hathaway, D.H. (2015). The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, Volume 12, Issue 1.
- Hayakawa, H., Iwahashi, K., Ebihara, Y., Tamazawa, H., Shibata, K., Knipp, D.J., Kawamura, A.D., Hattori, K., Mase, K., Nakanishi, I., Isobe, H. (2017). Long-lasting Extreme Magnetic Storm Activities in 1770 Found in Historical Documents. *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 850, Issue 2.
- Hayakawa, H., Ebihara, Y., Hand, D.P., Hayakawa, S., Kumar, S., Mukherjee, S., Veenadhari, B. (2018). Low-latitude Aurorae during the Extreme Space Weather Events in 1859. *The Astrophysical Journal*, Volume 869, Issue 1.
- Hayakawa, H., Ebihara, Y., Vaquero, J.M., Hattori, K., Carrasco, V.M.S., de la Cruz Gallego, M., Hayakawa, S., Watanabe, Y., Iwahashi, K., Tamazawa, H., Kawamura, A.D., Isobe, H. (2018). A great space weather event in February 1730. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 616.
- Hayakawa, H., Ebihara, Y., Willis, D.M., Hattori, K., Giunta, A.S., Wild, M.N., Hayakawa, S., Toriumi, S., Mitsuma, Y., Macdonald, L.T., Shibata, K., Silverman, S.M. (2018). The Great Space Weather Event during 1872 February Recorded in East Asia. *The Astrophysical Journal*, Volume 862, Issue 1.
- Hayakawa, H., Ebihara, Y., Willis, D.M., Toriumi, S., Iju, T., Hattori, K., Wild, M.N., Oliveira, D.M., Ermolli, I., Ribeiro, J.R., Correia, A.P., Ribeiro, A.I., Knipp, D.J. (2019). Temporal and Spatial Evolutions of a Large Sunspot Group and Great Auroral Storms Around the Carrington Event in 1859. *Space Weather*, Volume 17, Issue 11, pp. 1553–1569.
- Heinsius, J.S. (1755). Der Königl. Schwedischen Akademie der Wissenschaften Abhandlungen aus der Naturlehre, Haushaltungskunst und Mechanik auf das Jahr 1752. *Hamburg und Leipzig*, 1755.
- Heis, E. (1859). Wochenschrift für Astronomie, Meteorologie und Geographie. *Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie, Fachbereich Geowissenschaften, Neue Folge, Zweiter Jahrgang 1859*, Halle, Druck und Verlag von H.W. Schmidt.

- Heise, S. (2002). Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS-Messungen. *Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie, Fachbereich Geowissenschaften*
- Held, L. (2008). Methoden der statistischen Inferenz - Likelihood und Bayes. *Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg*.
- Heuson, J.C. (1721). Kurtze Betrachtung über zwey Phaenomena oder Lufft-Geschichte, welche sonst Lumen Boreale seu Aurora Borealis genennet werden. *Multz, Franckfurth am Mayn*, 1721.
- Holzworth, R. (1974). Folklore and the aurora. *History of Geophysics*, 1, 41–43.
- Holzworth, R.H., Meng, C.I. (1975). Mathematical representation of the Auroral Oval. *Geophysical Research Letters*, Vol. 2, No. 9.
- Hoslin, J. (1784). Meteorologische und Witterungsbeobachtungen auf 19 Jahre. *Tübingen*, 1784.
- Hough, F.B. (1855). Results of a series of meteorological observations, made in obedience to instructions from the regents of the University, at sundry academies in the state of New York, from 1826 to 1850 inclusive. *University of the State of New York*, 1855.
- Hoyt, D.V., Schatten, K.H. (1998). Group Sunspot Numbers: A New Solar Activity Reconstruction. *Solar Physics*, Volume 179, Issue 1, pp 189–219.
- Huxham, J. (1738). An account of a book intituled, Observationes de Aere und Morbis epidemicis, ab anno 1728, ad finem anni 1737, Plymuthi factae. *Philosophical Transactions*, Volume 40, Issue 451.
- Jackson, A., Jonkers, A.R.T., Walker, M.R. (2000). Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Geomagnetic polarity reversals and long-term secular variation. Papers of a Discussion Meeting held at The Royal Society. Roy Soc of London Phil Tr A*, Volume 358, Issue 1768, p.957.
- Kamide, Y., Chian, A. (2007). Handbook of the Solar-Terrestrial-Environment. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2007.
- Kanold, J. (1719). Sammlung von Natur- und Medicin- wie auch hierzu gehöriger Kunst- und Literatur-Geschichten so sich von 1717-26 in Schlesien und anderen Orten begeben ... und als Versuch ans Licht gestellet. *Erfurt*, 1719.

- Kanold, J. (1720). Sammlung von Natur- und Medicin- wie auch hierzu gehöriger Kunst- und Literatur-Geschichten so sich von 1717-26 in Schlesien und anderen Orten begeben ... und als Versuch ans Licht gestellet. *Erfurt*, 1720.
- Kassner (1770). Berlin Aurorae 1707 – 1770. rda.ucar.edu/datasets/ds836.0/, abgerufen am: 11.02.2020.
- Kataoka, R., Kiyomi, I. (2017). Inclined Zenith Aurora over Kyoto on 17 September 1770: Graphical Evidence of Extreme Magnetic Storm. *Space Weather*, Volume 15, Issue 10, pp. 1314–1320.
- Kimball, D.S. (1960). A study of the aurora of 1859. *Geophys.Inst., Univ.ofAlaska*, Report UAG-R109.
- Kirch, C. (1716). Aufrichtiger Bericht von dem in itztlauffenden 1716den Jahre den 17. Martii Abends entstandenen ungewöhnlichen Nord-Schein. Wie solcher allhier in Dantzig/ ... observiret und ... abgezeichnet worden. *Danzig*, 1716.
- Koch, K.R. (2000). Einführung in die Bayes-Statistik. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Korte, M., Manda, M. (2008). Magnetic poles and dipole tilt variation over the past decades to millennia. *Earth Planets Space*, 60, 937–948.
- Korte, M., Donadini, F., Constable, C. (2009). Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Volume 10, Issue 6.
- Korte, M., Stolze, S. (2016). Variations in Mid-Latitude Auroral Activity During the Holocene. *archaeometry*, Volume 58, Issue 1, pp. 159–176.
- Korte, M., Brown, M., Frank, U., Senftleben, R., Nowaczyk, N. (2018). Global Geomagnetic Field Reconstructions from Centuries to Excursions. *Magnetic Fields in the Solar System. Series: Astrophysics and Space Science Library*, Volume 448, pp. 83–110.
- Kosar, B.C., MacDonald, E.A., Case, N.A., Zhang, Y., Mitchell, E.J., Viereck, R. (2018). A case study comparing citizen science aurora data with global auroral boundaries derived from satellite imagery and empirical models. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 177, p. 274–282.
- Krivsky, L., Pejml, K. (1988). World list of polar aurorae $<55^\circ$ and their secular variations, Part II. *Astron. Inst. Czech. Acad. Sci.*, 75, 32–68.

- Krivsky, L., Pejml, K. (1988). Solar Activity, Aurorae and Climate in Central Europe in the Last 1000 Years. *Astron. Inst. Czech. Acad. Sci.*, 75.
- Lakhina, G. S., Alex, S., Mukherjee, S., Vichare, G. (2006). On magnetic storms and substorms. *Proceedings of the ILWS Workshop. Goa, India. February 19-24, 2006*.
- Larmor, J. (1919a). Possible rotational origin of magnetic fields of the sun and earth. *Elec. Rev.*, 85, 412.
- Lassen, K., Laursen, O.R., Olsen, U.J. (1963). Danish Visual Aurora Observations 1957–1960. *Medd. Danske Met. Inst.* No. 18.
- Laundal, K.M., Richmond, A.D. (2017). Magnetic Coordinate Systems. *Space Science Reviews*, Volume 206, Issue 1–4, pp. 27–59.
- Lee, E.H., Ahn, Y.S., Yang, H.J., Chen, K.Y (2004). The Sunspot and Auroral Activity Cycle Derived from Korean Historical Records of the 11th–18th Century. *Solar Physics*, Volume 224, Issue 1–2, pp 373–386.
- Licht, A., Hulot, G., Gallet, Y., Thebault, E. (2013). Ensembles of low degree archeomagnetic field models for the past three millennia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volume 224, p. 38–67.
- Link, F. (1962). Observations et Catalogue des Aurores Boreales apparues en Occident de -626 a 1600. *Travaux de l'Institut Geophysique de l'Academie Techechoslovaque des Sciences*, No. 173, 297–379.
- L'Isle, J.N. (1738). Memoires Pour Servir A L'Histoire Et Au Progres De L'Astronomie, De La Geographie, Et De La Physique. *St. Petersburg*, 1738.
- Lockwood, M., Chambodut, A., Barnard, L.A., Owens, M.J., Clarke, E., Mendel, V. (2018). A homogeneous aa index: 1. Secular variation. *J. Space Weather Space Clim.*, Volume 8, A 53.
- Loomis, E. (1860). The great auroral exhibition of Aug. 28th to Sept. 4th, 1859; and the geographical distribution of auroras and thunder storms. *American Journal of Science*, Issue 88, pp. 79–100.
- Love J.J., Remick K.J. (2007). Magnetic Indices. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds) *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer (Dordrecht).
- Love, J.J. (2017). The Electric Storm of November 1882. *Space Weather*, Volume 16, Issue 1, pp. 37–46.

- Lovering, J. (1868). On the periodicity of the Aurora borealis. *Memoirs of the American Academy of Arts and Sciences*, Volume 10.
- Lovering, J. (1868). Catalogue of Auroras observed, mostly at Cambridge, after the year 1838. *Memoirs of the American Academy of Arts and Sciences*, Volume 10.
- Lowe, E.J. (1870). Natural Phenomena and Chronology of the Seasons. *London: Bell and Daldy, York Street, Covent Garden*.
- Lu, Y., Zhang, H., Wang, M., Gu, C., Guan, H. (2019). Magnetosphere response to the IMF turning from north to south. *Earth and Planetary Physics*, Volume 3, Issue 1.
- MacDonald, E.A., Case, N.A., Clayton, J.H., Hall, M.K., Heavner, M., Lalone, N., Patel, K.G., Tapia, A. (2015). Aurorasaurus: A citizen science platform for viewing and reporting the aurora. *Space Weather*, Volume 13, Issue 9, pp. 548–559.
- Matsushita, S. (1956). Ancient Aurorae seen in Japan. *J. Geophys. Res.*, 61, 297–302.
- Maurya, A.K., Venkatesham, K., Kumar, S., Singh, R., Tiwari, P., Singh, A.K. (2018). Effects of St. Patrick's Day Geomagnetic Storm of March 2015 and of June 2015 on Low-Equatorial D Region Ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Volume 123, Issue 8, pp. 6836–6850.
- McPherron, R.L. (2020). Geomagnetic field. *Encyclopaedia Britannica, inc.*, <https://www.britannica.com/science/geomagnetic-field>, abgerufen am: 04.02.2020
- Mencke, O., Mencke, J.B., Jöcher, C.G. (1716). Acta eruditorum anno MDCLXXXII. *Lipsiae, prostant apud J. Grossi aeredes und J. F. Gleditschium*.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFaden, P.L. (1998). The Magnetic Field of Earth - Paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle. *San Diego, Calif.: Academic Press*
- Meus, J. (1975). Comments on The Jupiter Effect. *Icarus*, Volume 26, Issue 2.
- Milan, S.E., Hutchinson, J., Boakes, P.D., Hubert, P. (2009). Influences on the radius of the auroral oval. *Ann. Geophys.*, 28, 1003–1012.
- Milan, S.E., Evans, T.A., Hubert, B. (2010). Average auroral configuration parameterized by geomagnetic activity and solar wind conditions. *Ann. Geophys.*, 27, 2913–2924.
- Mohl, H., Plieninger, T., Menzel, W., Krauss, F. (1849). Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg, Band 4. *Verlag von Ebner und Seubert, Stuttgart*, 1849.

- Société Royale des Sciences (1771). Choix des Meilleurs Mémoires de Mathématique et de Physique, Qui Ont Été Couronnés par la Société Royale des Sciences, Établie à Montpellier. *Chez les Libraires associés*, 1771.
- Morgan, J.H. (1848). An account of the Aurora Borealis, seen near Cambridge, October the 24th, 1847: together with those of September 21, 1846, and March 19, 1847, seen at the Cambridge Observatory. *Cambridge*, 1848.
- Musschenbroek, P., Musschenbroek, J. (1739). Beginsels der Naturkunde, beschreeven ten Dienste der Landgenooten. *Lyden*, 1739.
- Neuhäuser, R., Neuhäuser, D.L. (2015). Solar activity around AD 775 from aurorae and radiocarbon. *Astronomische Nachrichten*, 336, Issue 3, 225–248.
- Neuhäuser, R., Neuhäuser, D.L. (2015). Variations of ^{14}C around AD 775 and AD 1795 - due to solar activity. *Astronomische Nachrichten*, 336, Issue 10.
- Newell, P.T., Sotirelis, T., Wing, S. (2009). Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget. *J. Geophys. Res.*, Volume 114, Issue A9.
- Nilsson, A., Holme, R., Korte, M., Suttie, N., Hill, M. (2014). Reconstructing Holocene geomagnetic field variations: new methods, models and implications. *Geophys. J. Int.*, 198, 229–248.
- Odenwald, S. (2017). The Day the Sun Brought Darkness. https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html, abgerufen am: 17.02.2020.
- Olsen, L., Hulot, G., Sabaka, T.J. (2015). Handbook of Geomathematics. *Springer, Berlin, Heidelberg*.
- Rexer T. (2015). Current systems associated with non-conjugate aurora. *Birkeland Center for Space Science, University of Bergen, Norway*
- Panovska, S., Korte, M., Finlay, C.C., Constable, C.G. (2015). Limitations in paleomagnetic data and modelling techniques and their impact on Holocene geomagnetic field models. *Geophys. J. Int.*, 202, 402–418.
- Parker, E.N. (1955). Hydromagnetic Dynamo Models. *Astrophysical Journal*, Volume 122, p.293.
- Paschmann, G., Halland, S., Treumann, R. (2002). Auroral Plasma Physics. *Space Science Reviews*, Volume 103, Issue 1.

- Pesnall, W.D. (2016). Watching the Sun from space. *Asian Journal of Physics*, Volume 25, No. 3, 233–265.
- Philosophical Transactions (1716). A description of the Phaenomenon of March 6. last, as it was seen on the ocean, near the coast of Spain. *Philosophical Transactions*, Volume 29, Issue 348.
- Pilgram, A. (1788). Untersuchungen über das Wahrscheinliche der Wetterkunde durch Vieljährige Beobachtungen. *Wien*, 1788.
- Priede, J., Avalos-Zuniga, R., Plunian, F. (2010). Homopolar oscillating-disc dynamo driven by parametric resonance. *Physics Letters A*, Volume 374, Issue 4, p. 584–587.
- Pulkkinen, A., Lindahl, S., Viljanen, A., Pirjola, R. (2005). Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space Weather*, Volume 3, Issue 8.
- Rethly, A., Berkes, Z. (1963). Nordlichtbeobachtungen in Ungarn, 1523-1960. *Budapest, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften*.
- Richard, J. (1771). Histoire naturelle de l'air et des météores - Tome Dixieme. *Paris*, 1771.
- Roach, F.E., Smith, L.L. (1967). The Worldwide Morphology of the Atomic Oxygen Nightglows. *Aurora and Airglow, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute. New York: Reinhold Publishing Co.*, p.29.
- Robert, C.P. (2016). The Metropolis-Hastings algorithm. *arXiv:1504.01896v3*
- Roberts, A.P., Tauxe, L., Heslop, D. (2013). Magnetic paleointensity stratigraphy and high-resolution Quaternary geochronology: successes and future challenges. *Quaternary Science Reviews*, Volume 61, p. 1–16.
- Dopfer, E. (2015). 1847: Tagebuch 1847 - 1849 von Karl Georg Valentin Rost. *Books on Demand, Norderstedt*.
- Rubenson, R. (1882). Catalogue des aurores boreales observees en Suede. *Kungl. Sv. Vetenskapsakad. Handl.*, 18, 1–300.
- Sabine, E. (1852). On periodical laws discoverable in the mean effects of the larger magnetic disturbance. *Philos. Trans.*, 142, 103–124.

- Schlegel, B., Schlegel, K. (2011). Polarlichter zwischen Wunder und Wirklichkeit - Kulturgeschichte und Physik einer Himmelserscheinung. *Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg*
- Schrijver, C.J., Siscoe, G.L. (2010). Heliophysics: Space Storms and Radiation: Causes and Effects. *Cambridge University Press*
- Schroeder, W. (1979). Auroral frequency in the 17th and 18th centuries and the “Maunder minimum”. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Volume 41, Issue 5, pp. 445–446.
- Schubert, G., Kono, M. (2007). Treatise on Geophysics Volume 5 - Geomagnetism. *Elsevier B.V. Amsterdam*
- Schwabe, S.H. (1844). Solar observations during 1843. *Astron. Nachr.*, 21, 233.
- Seydl, O. (1954). A list of 403 northern lights observed in Bohemia, Moravia and Slovakia from 1013 till 1952. *Geofyz. Sbornik, Praha*.
- Siedentopf (1959). Polarlicht und Nachthimmelsleuchten. *Naturwissenschaften*), Volume 46, Issue 9, pp. 309–314.
- Sigernes, F., Dyrland, M., Brekke, P., Gjengedal, E.K., Chernouss, S., Lorentzen, D.A., Oksavik, K., Deehr, C.S. (2011). Real time aurora oval forecasting - SvalTrackII. *Optica Pura y Aplicada (OPA)*, Volume 44, Issue 4, pp. 599–603.
- Sigernes, F., Dyrland, M., Brekke, P., Chernouss, S., Lorentzen, D.A., Oksavik, K., Deehr, C.S. (2011). Two methods to forecast auroral displays. *J. Space Weather Space Clim.*, 1, A03.
- Silliman, B., Silliman, B. (Jr.), Dana, J.D. (1859). The American Journal of Science and Arts. Volume XXVIII - November 1859, New Haven: Editors.
- Silliman, B., Silliman, B. (Jr.), Dana, J.D. (1860). The American Journal of Science and Arts. Volume XXIX - May 1860, New Haven: Editors.
- Silliman, B., Silliman, B. (Jr.), Dana, J.D. (1860). The American Journal of Science and Arts. Volume XXX - November 1860, New Haven: Editors.
- Siscoe, G.L., Verosub, K.L. (1983). High medieval auroral incidence over China and Japan: Implications for the medieval site of the geomagnetic pole. *Geophysical Research Letters*, Volume 10, Issue 4, pp. 345–348.

- Siscoe, G.L., Siebert, K.D. (2002). Solar-terrestrial effects possible stronger in biblical times. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 1905–9.
- Siscoe, G.L., Crooker, N.U., Clauer, C.R. (2006). Dst of the Carrington storm of 1859. *Advances in Space Research*, Volume 38, Issue 2, p. 173–179.
- Solanki, S.K., Usoskin, I.G., Kromer, B., Schüssler, M., Beer, J. (2004). Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 431, pp. 1084 – 1087.
- Solanki, S.K., Usoskin, I.G., Kromer, B., Schüssler, M., Beer, J. (2005). How unusual is today’s solar activity? (reply). *Nature*, 436, E4 – E5.
- Starkov, G.V. (1994). Mathematical model of the auroral boundaries. *Geomagnetism and Aeronomy*, Volume 34, Issue 2.
- Stephenson, F.R., Willis, D.M., Hayakawa, H., Ebihara, Y., Scott, C.J., Wilkinson, J., Wild, M.N. (2019). Do the Chinese Astronomical Records Dated AD 776 January 12/13 Describe an Auroral Display or a Lunar Halo? A Critical Re-examination . *Solar Physics*, Volume 294, Issue 4.
- Stetson, H.C., Brooks, C.F. (1942). Auroras Observed at the Blue Hill Observatory, 1885 - 1940. *J. Geophys. Res.*, Volume 47, Issue 1.
- Stubbs, T.J., Vondrak, R.R., Østgaard, N., Sigwarth, J.B., Frank, L.A. (2005). Simultaneous observations of the auroral ovals in both hemispheres under varying conditions. *Geophysical Research Letters*, Volume 32.
- Stuiver, M., Quay, P.D. (1980). Changes in Atmospheric Carbon-14 Attributed to a Variable Sun. *Science*, Volume 207, No. 4426.
- Tamazawa, H., Kawamura, A.D., Hayakawa, H., Tsukamoto, A., Isobe, H., Ebihara, Y. (2017). Records of sunspot and aurora activity during 581-959 CE in Chinese official histories concerning the periods of Suí, Táng, and the Five Dynasties and Ten Kingdoms. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 69, Issue 2, id.22.
- Thebault, E. et al. (2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67:79
- Thomsen, M.F. (2004). Why Kp is such a good measure of magnetospheric convection. *Space Weather*, Volume 2, Issue 11.

- Tromholt, S. (1902). Catalog der in Norwegen bis Juni 1878 beobachteten Nordlichter. *In commission bei J. Dybwad, Kristiania.*
- Vaquero, J.M., Gallego, M.C., Garcia, J.A. (2003). Auroras observed in the Iberian Peninsula (1700-1855) from Rico Sinobas' catalogue. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 65, Issue 6, p. 677—682.
- Vaquero, J.M., Svalgaard, L., Carrasco, V.M.S., Clette, F., Lefèvre, L., Gallego, M.C., Arlt, R., Aparicio, A.J.P., Richard, J.G., Howe, R. (2016). A Revised Collection of Sunspot Group Numbers. *Solar Physics*, Volume 291, Issue 9–10, p. 3061—3074.
- Visser, S.W. (1942). Catalogue of Dutch Aurorae 1728 – 1940. rda.ucar.edu/datasets/ds836.0/, abgerufen am: 11.02.2020.
- Wagner, D., Neuhäuser, R. (2019). Variation of the auroral oval size and offset for different magnetic activity levels described by the Kp-index. *Astron. Nachr.*, 2019;1–11.
- Wang, C., Han, J.P., Peng, Z., Richardson, J.D. (2014). Solar wind-magnetosphere energy coupling function fitting: Results from a global MHD simulation. *JGR Space Physics*, Volume 119, Issue 8, pp. 6199–6212.
- Wang, Y. et al. (2016). On the Propagation of a Geoeffective Coronal Mass Ejection during March 15-17, 2015. *:1607.07750*
- Weidler (1731). De meteoro lucido singulari a. MDCCXXX m. octobri conspecto dissertatio qua observationes madritensis et vitembergensis inter se comparantur. *Virembergae*, 1731.
- Weiss, L.A., Reiff, P.H., Hilmer, R.V., Winningham, J.D., Lu, G. (1992). Mapping the Auroral Oval into the Magnetotail using Dynamics Explorer Plasma Data. *J. Geomag. Geoelectr.*, 44, 1121–1144.
- Weiss, N.O. (2006). Sunspot structure and dynamics. *Space Science Reviews*, Volume 124, Issue 1–4, pp 13–22.
- Wetterchronik Zwickau, <http://wetterstation-zwickau.de/wetterchronik/index.html>, abgerufen am: 17.05.2019.
- Williams, D.R. (2017). Dynamics Explorer 1. [https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=\\$1981-070A](https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=$1981-070A), abgerufen am: 09 August 2017
- Willis, D.M., Stephenson, F.R., Fang, H. (2007). Sporadic aurorae observed in east Asia. *Ann. Geophys.*, 25, 417–436.

- Willmer, C.N.A. (2018). The Absolute Magnitude of the Sun in Several Filters. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 236, Issue 2.
- Wieniger, H. (1853). Auszug in: Mittheilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern. *Mittheilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern*, 1853.
- Wolff, C. (1716). Gedanken über das ungewöhnliche Phaenomenon, welches den 17. Martii 1716 des Abends nach 7. Uhren zu Halle und an vielen anderen Orten in und ausserhalb Deutschlands gesehen worden. *Universität zu Halle*.
- Xiong, C., Lühr, H., Wang, H., Johnsen, M.G. (2014). Determining the boundaries of the auroral oval from CHAMP field-aligned current signatures - Part 1. *Ann. Geophys.*, 32, 609–622.
- Xiong, C., Lühr, H. (2014). An empirical model of the auroral oval derived from CHAMP field-aligned current signatures - Part 2. *Ann. Geophys.*, 32, 623–631.
- Yau, K.K.C., Stephenson, F.R., Willis, D.M. (1995). A catalogue of auroral observations from China, Korea and Japan (193 B.C. - A.D. 1770). *Rutherford Appleton Lab., Chilton (UK)*.
- Yokoyama, N., Kamida, Y., Miyaoka, H. (1998). The size of the auroral belt during magnetic storms. *Ann. Geophys.*, 16, 566–573.
- Zhang, Y., Paxton, L.J. (2008). An empirical Kp-dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, 1231–1242.
- Zotti, G., Wolf, A., Gates, M., Gerde, B. (2017). Stellarium 0.16.1 User Guide. https://www.researchgate.net/publication/319987634_Stellarium_0161_User_Guide, abgerufen am: 11.02.2018.

Danksagung

Hiermit bedanke ich mich bei den Menschen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle gilt mein ausdrücklicher Dank Herrn Professor Ralph Neuhäuser. Während meiner Promotion hatte er immer ein offenes Ohr und stand mir stets mit Rat zur Seite.

Für die Bereitschaft zur Begutachtung dieser Dissertation danke ich Professor Hermann Lühr und Professor Arnold Hanslmeier.

Besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei Doktor Rainer Arlt sowie Doktor Monika Korte für die gemeinsame und sehr ertragreiche Arbeit bedanken. Ich danke euch für eure Unterstützung, ohne die diese Arbeit in der Form nicht möglich gewesen wäre.

Für das ausführliche Lesen des Manuskriptes dieser Arbeit und die hilfreichen Kommentare dazu, danke ich Andreas Schoepe, Susanne Hoffmann, Susanne Richter, Richard Bischoff und Michael Geymeier.

Meinen Eltern Heike und Uwe Wagner danke ich ganz herzlich für all die Unterstützung während meiner Promotion und meines Studiums, welche weit über das Finanzielle hinaus ging.

Ganz besonderer Dank gilt einem sehr wichtigen Menschen in meinem Leben: Eleen Hammer. Ich danke dir für das intensive Lesen meiner Arbeit sowie die seelische Unterstützung und das gute Gefühl, welches du mir stets gibst.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel und Literatur angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung dieser Arbeit haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in beratender Weise unentgeltlich geholfen:

- Dr. Rainer Arlt
- Dr. Monika Korte
- Dr. Valerie Hambaryan
- Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die geltende Promotionsordnung der Physikalisch-Astronomischen Fakultät ist mir bekannt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Jena, 3. Juni 2020

Daniel Wagner

Lehre

Lehre

Semester	Veranstaltung	Dozent
WS 2015/16	Physikalisches Grundpraktikum für Bachelor/Physik	Prof. K. Schreyer
SS 2016	Übungsleiter “Neutronensterne”	Prof. R. Neuhäuser
WS 2016/17	Oberseminar Astrophysik “Historische Astronomie”	Prof. R. Neuhäuser
SS 2017	Übungsleiter “Terra-Astronomie”	Prof. R. Neuhäuser
WS 2017/18	Oberseminar Astrophysik “Entfernungsleiter der Astrophysik”	Prof. R. Neuhäuser
SS 2018	Physikalisches Grundpraktikum für Nebenfächler	Prof. K. Schreyer
WS 2018/19	Physikalisches Grundpraktikum für Bachelor/Physik	Prof. K. Schreyer
SS 2019	Physikalisches Grundpraktikum für Nebenfächler	Prof. K. Schreyer
WS 2019/20	Physikalisches Grundpraktikum für Bachelor/Physik	Prof. K. Schreyer
SS 2020	Physikalisches Grundpraktikum für Nebenfächler	Prof. K. Schreyer

Jena, 3. Juni 2020

Daniel Wagner

Veröffentlichungen und Vorträge

Veröffentlichungen

- [Hambaryan et al., 2015] Hambaryan, V., Wagner, D., Schmidt, J.G., Hohle, M.M., Neuhäuser, R. (2015). 3XMM J185246.6+003317 as transient neutron star. *Astronomische Nachrichten*, Volume 336, Issue 6, p. 545 - 565.
- [Bischoff et al., 2017] Bischoff, R., Mugrauer, M., Zehe, T., Wöckel, D., Pannicke, A., Lux, O., Wagner, D., Heyne, T., Adam, C., Neuhäuser, R. (2017). Radial velocity measurements and orbit determination of eight single-lined spectroscopic binary systems. *Astronomische Nachrichten*, Volume 338, Issue 6, pp. 671 - 679.
- [Zehe et al., 2018] Zehe, T., Mugrauer, M., Neuhäuser, R., Pannicke, A., Lux, O., Bischoff, R., Wöckel, D., Wagner, D. (2018). The radial and rotational velocity of ζ Ophiuchi. *Astronomische Nachrichten*, Volume 339, Issue 1, pp. 46 - 52.
- [Huang et al., 2019] Huang, P.C., Chen, W.P., Mugrauer, M., Bischoff, R., Budaj, J., Burkhanov, O., Eghamberdiev, S., Errmann, R., Garai, Z., Hsiao, H.Y., Hu, C.L., Janulis, R., Jensen, E.L.N., Kiyota, S., Kuramoto, K., Lin, C.S., Lin, H.C., Liu, J.Z., Lux, O., Naito, H., Neuhäuser, R., Ohlert, J., Pakštienė, E., Pribulla, T., Qvam, J.K.T., Raetz, S., Sato, S., Schwartz, M., Semkov, E., Takagi, S., Wagner, D., Watanabe, M., Zhang, Y. (2015). Diagnosing the Clumpy Protoplanetary Disk of the UXor Type Young Star GM Cephei. *The Astrophysical Journal*, Volume 871, Issue 2.
- [Wagner et al., 2019] Wagner, D., Neuhäuser, R. (2019). Variation of the auroral oval size and offset for different magnetic activity levels described by the Kp-index. *Astronomische Nachrichten*, Volume 340, Issue 6, pp. 483 - 493.
- [Heyne et al., 2020] Heyne, T., Mugrauer, M., Bischoff, R., Wagner, D., Hoffmann, S., Lux, O., Munz, V., Geymeier, M., Neuhäuser, R. (2020). Spectroscopic cha-

racterization of nine binary star systems as well as HIP 107136 and HIP 107533. *Astronomische Nachrichten*, Volume 341, Issue 1, pp. 99 - 117.

- [Bischoff et al., 2020] Bischoff, R., Mugrauer, M., Lux, O., Zehe, T., Heyne, T., Wagner, D., Neuhäuser, R. (2020). Spectroscopic orbit determination of the long-periodic binary system θ Cep. *Astronomische Nachrichten*, in Vorbereitung.
- [Heyne et al., 2020] Heyne, T., Mugrauer, M., Bischoff, R., Wagner, D., Neuhäuser, R. (2020). Radial Velocity Measurements of the Runaway Stars AE Aur and ι Ori. *Astronomische Nachrichten*, in Vorbereitung.
- [Wagner et al., 2020] Wagner, D., Arlt, R., Neuhäuser, R. (2020). Bayesian approach for auroral oval reconstruction from ground-based observations. *Space Weather*, in Vorbereitung.

Vorträge und Poster

- Poster: „Variation of the auroral oval size and offset“
IAU Symposium 340, Jaipur/Indien, 19.02. - 24.02.2018
- Poster: „Aurorae modulated by solar wind as proxy for historical space weather“
EGU General Assembly, Wien/Österreich, 08.04. - 13.04.2018
- Vortrag: „Variation of the auroral oval size and offset from the Spin-Scan Auroral Imager“
EGU General Assembly, Wien/Österreich, 08.04. - 13.04.2018
- Vortrag: „Polarlichter als Proxy der Sonnenaktivität“
41. Sonnentagung der VdS-Fachgruppe Sonne, Sonneberg, 06.07. - 08.07.2018
- Vortrag: „Reconstructing the geomagnetic field from historical aurorae“
IAU General Assembly, Wien/Österreich, 20.08. - 31.08.2018
- Vortrag: „Reconstruction of geomagnetic field properties from ground-based aurora observations“
ESPC 2019, Jena, 13.03. - 15.03.2019

Weitere Konferenzen und Workshops

- Space Climate 6 - School & Symposium. Levi/Finnland, 30.03. - 07.04.2016